

Información Importante

La Universidad Santo Tomás, informa que el(los) autor(es) ha(n) autorizado a usuarios internos y externos de la institución a consultar el contenido de este documento a través del catálogo en línea, página web y Repositorio Institucional del CRAI-USTA, así como en las redes sociales y demás sitios web de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad.

Se permite la consulta a los usuarios interesados en el contenido de este documento, para todos los usos que tengan **finalidad académica**, siempre y cuando mediante la correspondiente cita bibliográfica se le dé crédito al trabajo de grado y a su autor, nunca para usos comerciales.

De conformidad con lo establecido en el Artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, la Universidad Santo Tomás informa que “los derechos morales sobre documento son propiedad de los autores, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.”

Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación, CRAI-USTA

Universidad Santo Tomás, Bucaramanga

**Consideraciones técnicas en el diseño de un Sistema de Vigilancia de la Calidad del aire
para la Zona Metropolitana de Bucaramanga**

Maher Jerania Góngora Torres

Trabajo de grado para optar al título de Magíster en Ciencias y Tecnologías Ambientales

Director

Amilcar Rizzo Alvarado

Ingeniero Químico

MSc. Ingeniería Ambiental

Universidad Santo Tomás

División De Ingenierías Y Arquitectura

Facultad de Química Ambiental

2020

Tabla de contenido

1	Definición del problema.....	8
2	Justificación.....	16
3	Objetivos	18
3.1	Objetivo general.....	18
3.2	Objetivos específicos	18
4	Marco referencial de los sistemas de vigilancia de la calidad del aire SVCA	19
4.1	Contaminantes Atmosféricos.....	19
4.2	Norma Nacional de calidad del aire.....	23
4.3	Indicadores de Calidad de Aire.....	24
4.4	Métodos de medición de la calidad del aire.....	26
4.5	Monitoreo a través de los SVCA	27
4.5.1	Escala de monitoreo para un SVCA	27
4.5.2	Estaciones de Monitoreo.....	28
4.5.3	Sistemas de medición y algunas aplicaciones de SVCA.	29
5	Aspectos y condiciones geográficas, ambientales y de salud de la zona objetivo	35
5.1	Meteorología Local.....	37
5.1.1	Precipitación	37
5.1.2	Temperatura	38
5.1.3	Humedad Relativa.....	39
5.1.4	Vientos	39
5.2	Usos del suelo	40
5.3	Fuentes e Inventario de emisiones	41
5.3.1	Fuentes de emisión.....	42
5.3.2	Inventario de Emisiones.....	50
5.4	Aspectos de Salud Pública	53
5.5	Síntesis de las condiciones físico-ambientales y de salud de la ZMB.	55
5.6	Definición de la línea base ambiental para la ZMB.....	56
6	Consideraciones técnicas en el diseño del SVCA para la ZMB.....	64
6.1	Descripción del modelo estructural para el SVCA	65

6.1.1	Dominio del SVCA.....	65
6.1.2	Escala de representatividad del contaminante y tipo de sitio	65
6.1.3	Objetivos del SVCA	66
6.2	Criterios a considerar para el SVCA de la ZMB	66
6.2.1	Contaminantes a monitorear	67
6.2.2	Especiación química de un contaminante atmosférico	68
6.2.3	Número de estaciones propuestas	68
6.2.4	Tecnologías sugeridas para los equipos de monitoreo del SVCA	72
6.3	Esquema modular representativo del SVCA	78
7	Conclusiones y Recomendaciones	80
7.1	Conclusiones	80
7.2	Recomendaciones	81
	Bibliografía.....	84

Lista de figuras

Figura 1 Red de Calidad de Aire en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá.....	32
Figura 2 Dirección de Monitoreo Atmosférico página oficial.....	32
Figura 3 Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire – Chile.....	35
Figura 4 Zona comprendida por el Área Metropolitana de Bucaramanga.....	36
Figura 5 Distribución Poblacional y Extensión Territorial de la Zona Metropolitana de Bucaramanga.....	37
Figura 6 Reporte precipitaciones cuenca Río de Oro	38
Figura 7 Velocidad y Rosa de Vientos.	40
Figura 8 Usos de suelo AMB.....	41
Figura 9. Número de Empresas que poseen fuentes fijas por sector Municipal. Año 2017	42
Figura 10. Distribución por Sector Industrial y Municipio.....	44
Figura 11. Distribución de las emisiones de fuentes por sector 2017 [unidades en Mg/año].....	44
Figura 12. Infraestructura Vial.....	45
Figura 13. Conflicto de Movilidad.....	48
Figura 14. Emisiones Fuentes Móviles.....	50
Figura 15. Concentraciones promedio anuales para las estaciones de la CDMB 2007 - 2010.....	59
Figura 16. IBUCA para ZMB 2014	60
Figura 17 Reporte mediciones por Contaminante SVCA – AMB.....	61
Figura 18. ICA SVCA - AMB (Julio – Septiembre 2019)	62
Figura 19 Ubicación estaciones SVCA – AMB	64
Figura 20. Arquitectura del SVCA propuesto.....	78

Lista de tablas

Tabla 1 Descripción de los contaminantes criterio	20
Tabla 2 Contaminantes tóxicos en el aire	21
Tabla 3 Normas de Calidad del Aire para Algunos Países	23
Tabla 4 Norma Nacional de Calidad del Aire para los Contaminantes Criterio.....	24
Tabla 5. Norma de Calidad del Aire para Contaminantes Tóxicos	24
Tabla 6 Punto de Corte ICA a nivel nacional	25
Tabla 7 Métodos de Medición de la Calidad del Aire	26
Tabla 8 Escalas espaciales de monitoreo para SVCA	28
Tabla 9 Tipos de SVCA.....	29
Tabla 10 Descripción Variación de la Temperatura en el AMB	38
Tabla 11. Temperatura Promedio por Municipios.....	39
Tabla 12 Descripción del uso del Suelo por Municipio.....	41
Tabla 13 Flujos Vehiculares del AMB.	46
Tabla 14 Porcentaje de viajes intermunicipales.....	47
Tabla 15 Parque Automotor de la ZMB	49
Tabla 16. Emisiones de contaminantes criterio por categoría vehicular 2016	51
Tabla 17 Emisiones de gases de efecto invernadero por categoría vehicular 2016.....	52
Tabla 18 Emisiones por sector en ton/año 2016	52
Tabla 19 Inventario Total de Emisiones ZMB, 2016	53
Tabla 20. Contaminantes a monitorear SVCA - ZMB	68
Tabla 21 Descripción SVCA Tipo III.....	69
Tabla 22 Distribución Geográfica estaciones SVCA propuesto	70
Tabla 23 Especificaciones equipos de Monitoreo Contaminantes Atmosféricos	74
Tabla 24. Especificaciones equipos de Monitoreo Meteorológico	76

Lista de Apéndices

Apéndice A. Distribución geográfica de las estaciones del sistema propuesto.

Nota

El apéndice A se encuentra como documento externo.

Listado de términos – Abreviaturas

- AMB – Área Metropolitana de Bucaramanga.
- CDMB - Corporación Autónoma Regional Para La Defensa De La Meseta De Bucaramanga.
- GEI – Gases de Efecto Invernadero
- IBUCA - Índice de Calidad del Aire para Bucaramanga y el Área Metropolitana.
- ICA – Índice de Calidad del Aire para Colombia.
- IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IRA – Infecciones Respiratorias Agudas
- MADS – Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- OMS – Organización Mundial de la Salud.
- OSPS - Observatorio de Salud Pública de Santander.
- SIMAT - Sistema de Monitoreo Atmosférico Ciudad de México.
- SVCA – Sistemas de Vigilancia de Calidad de Aire.
- USEPA - United States Environmental Protection Agency / Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos
- ZMB – Zona Metropolitana de Bucaramanga.

Resumen

Conocer el estado de la calidad del aire que respiramos es de importancia vital por ser esta un factor de fuerte impacto sobre la salud y el bienestar de las personas. El nivel de deterioro de la calidad del aire y su influencia en la salud, se relaciona directamente con la carga y características del material contaminante emitido hacia la atmósfera por determinado tipo de fuente. De estos aditamentos industriales se destacan los de origen antropogénico, como las fuentes fijas, típicamente asociadas a los procesos de producción y manufactura, las fuentes móviles y las fuentes naturales, que involucran, entre otras, los incendios forestales, las actividades volcánicas y la erosión. (IDEAM, 2016)

Con el objeto de conocer el panorama de la contaminación atmosférica urbana en Colombia, durante las últimas décadas se han venido implementando los Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire (SVCA) en las ciudades más pobladas, de mayor desarrollo y potencialmente más contaminadas. Administrados por las respectivas autoridades ambientales regionales, se monitorean principalmente las especies reguladas por las normas nacionales e internacionales (OMS), en especial, las denominadas *contaminantes criterio*, y dependiendo el caso, se monitorean aquellos contaminantes considerados en la literatura científica como tóxicos, que afectan la salud humana y el ambiente. El correcto monitoreo de campo y la oportuna vigilancia de los niveles permisibles de contaminante en el ambiente atmosférico, se reglamenta a través de la Resolución No. 2254 del 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible MADS.

Fundamentado en la normativa antes mencionada y por el apoyo que en los programas de Gestión Ambiental Urbana ofrecen los SVCA para determinar el estado de la calidad del aire, el

presente proyecto tiene como objetivo establecer los criterios a considerar en el diseño básico de un sistema de vigilancia para la Zona Metropolitana de Bucaramanga.

Dado que el actual SVCA fue instalado recientemente con equipos analizadores automáticos modernos y hacia el futuro se prevé evaluar su funcionamiento por parte del AMB, es oportuno explorar si la arquitectura actual de la red, al igual que su cobertura y el número de estaciones, son espacialmente representativas de las condiciones geográficas y ambientales para la zona. Igualmente, es conveniente explorar opciones para monitorear otros contaminantes del aire. La información adicional que arroje tal exploración, permitirá sugerir una nueva arquitectura para el sistema de monitoreo y sus componentes.

Se pretende, además, exponer los resultados del trabajo a las autoridades del área Metropolitana encargadas de la gestión de la calidad del aire, y de ser posible, considerarlos dentro de los proyectos de ampliación o mejoramiento del actual SVCA.

Palabras Claves: Calidad del aire, Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire, contaminante, fuentes fijas, fuentes móviles, monitoreo, criterios de diseño, arquitectura del sistema de monitoreo.

Abstract

Knowing the quality air condition we breathe is really importance because this is a factor with a strong impact on people's health and well-being. The level of air quality deterioration and its health influence is directly related to the polluting material load and characteristics emitted into the atmosphere by a certain type of source. Of these industrial attachments, those that belongs to anthropogenic origin stand out, such as stationary sources, typically associated with production and manufacturing processes, mobile sources and natural sources, which involve, among others, forest fires, volcanic activities and erosion. (IDEAM, 2016)

In order to get to know the urban air pollution panorama in Colombia, in the last decades Air Quality Surveillance Systems (SVCA) have been implemented in the most populated, most developed and potentially most polluted cities. Administered by the respective regional environmental authorities, the species regulated by national and international standards (OMS) are monitored, especially the so-called criteria pollutants, and depending on the case, those pollutants considered in the scientific literature as toxic are monitored, those that affect human health and the environment. The correct field monitoring and timely monitoring of the permissible pollutant levels in the atmospheric environment, are regulated through the Resolución No. 2254 del 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible MADS.

Based on the aforementioned regulations and the support that the SVCA offers in the Urban Environmental Management programs to determine the air quality condition, this project aims to establish the criteria to be considered in the basic design of a system of surveillance for the Zona Metropolitana de Bucaramanga.

Given that the current SVCA was recently installed with modern automatic analyzer equipment and it is planned to evaluate its operation by the AMB in the future, it is appropriate to explore whether the current network architecture, as well as its coverage and the amount of stations, are spatially representative of the geographical and environmental conditions for the area. Similarly, exploring options for monitoring other air pollutants is desirable. The additional information provided by such exploration will allow us to suggest a new architecture for the monitoring system and its components.

It is also intended to present the results of the work to the metropolitan area authorities in charge of air quality management, and if possible, consider them within the expansion or improvement projects of the current SVCA.

Key Words: Air quality, Air Quality Surveillance System, pollutant, stationary sources, mobile sources, monitoring, design criteria, monitoring system architecture.

1. Definición del problema

El acelerado aumento poblacional de las ciudades junto con el incremento de las actividades productivas y el consumo energético, están generando más estrés sobre el medio ambiente, con impactos negativos no solo a nivel local, sino también regional y global.

En las últimas décadas la contaminación atmosférica se ha convertido en uno de los problemas de mayor relevancia en las grandes urbes. La contaminación del aire es uno de los riesgos principales para la salud, pues se relaciona con altas tasas de morbi - mortalidad, indicadoras de deterioro ambiental y de baja calidad de vida. La contaminación atmosférica es, además, un factor causante del cambio climático, debido a la presencia de los gases de efecto invernadero, principalmente el dióxido de carbono y ozono que tiene como precursor el monóxido de carbono.

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS) investigaciones recientes han encontrado que la contaminación atmosférica urbana se ha incrementado en un 8% y un alto porcentaje de la población mundial (92%) vive en lugares donde los niveles de calidad del aire no cumplen con los estándares OMS (Prüss-Ustün A. et al, 2016). Se ha estimado, además, que una de cada nueve muertes alrededor del mundo está relacionada con la contaminación atmosférica. (OMS, 2016).

Debido a la importancia que presenta el problema de la contaminación atmosférica tanto a nivel regional como global, entidades tales como la OMS y la ONU han venido emitiendo directrices con el propósito de ser aplicadas en los diferentes países y/o ser debatidas en eventos científicos o cumbres internacionales en donde se efectúen acuerdos para beneficio del ambiente y en particular de la calidad del aire, como ha ocurrido a través del Protocolo de Kioto, el Acuerdo de Copenhague, el protocolo de Montreal, el convenio de Viena y el Acuerdo de Paris. (MADS)

Estudios realizados en países de América Latina, muestran que no menos de 100 millones de personas se encuentran expuestas a niveles de contaminación del aire por encima de los valores recomendados por la Organización Mundial de la Salud. (Cifuentes L. A, et al, 2005).

Una deficiente calidad del aire afecta la economía, la salud y el desarrollo social de los pueblos, resultando en graves atrasos para la competitividad de los mismos. El gasto por enfermedades debido a la contaminación del aire le puede costar anualmente a cada nación millones de dólares en medicina y pérdida de productividad. Se estima que, países como Bolivia, Guatemala, Ecuador, Perú y El Salvador, se han visto afectados hasta en un 2% del PIB por la contaminación atmosférica. (Cifuentes L. A, et al, 2005).

Por el panorama antes citado, durante las últimas décadas se han venido realizando esfuerzos para detener la contaminación del aire en diversos centros urbanos de América Latina. Algunos de los ejemplos más significativos en donde se ha logrado controlar esta problemática y cuyas acciones han sido ampliamente documentadas, se podrían mencionar las emprendidas en Ciudad de México, Bogotá, Sao Paulo y Santiago de Chile. No obstante, la contaminación del aire es un problema galopante debido al crecimiento progresivo de estas megaciudades por el aumento de su población, el mayor uso de combustibles fósiles, el incremento de las actividades industriales, el comercio, el transporte y el consumo desmedido de bienes y productos, tanto en las ciudades arriba mencionadas como también en otras emergentes de la región. (Green, J. & Sánchez, S, 2012)

Colombia no ha sido ajena a las consecuencias derivadas de la contaminación del aire. Este ha sido uno de los factores ambientales de mayor preocupación durante las últimas décadas por los impactos generados, tanto en la salud como en las obras de infraestructura urbanas y su entorno. Además, la contaminación del aire genera los mayores costos sociales y ambientales después de los ocasionados por la contaminación del agua y los desastres naturales. El Informe sobre la calidad

del aire en Colombia periodo 2011 – 2015, muestra las tendencias del material particulado $PM_{2.5}$ y el PM_{10} cuyos niveles de concentración excedieron los límites máximos permisibles establecidos en la Resolución 610 de 2010. Además, el Índice de Calidad del Aire representa altos riesgos de afectación a la salud de la población (IDEAM, 2016).

Un ejemplo donde se realizan constantes mejoras en los programas de gestión de la calidad del aire, se lleva a cabo en el Valle de Aburrá de la ciudad de Medellín, luego de las emergencias ambientales sufridas, como por ejemplo la alerta roja declarada en el mes de marzo del 2017 y el estado de prevención que se mantuvo durante el año 2019.

A nivel local, el informe IDEAM antes referenciado, menciona que el Departamento de Santander ocupa el quinto lugar en emisiones de dióxido de carbono (CO_2 equivalentes). De otro lado, la región presentó la mayor tasa de deforestación en el año 2012, equivalente al 6% a nivel nacional, situación adversa para los programas y acciones que se están realizando para reducir las emisiones, debido a la función de equilibrio que ofrecen las plantas como sumideros naturales para los gases de efecto invernadero.

En el 2017 se realizó un nuevo reporte nacional de la calidad del aire por parte del IDEAM, donde se evidencia que las Autoridades Ambientales han venido renovando sus SVCA con tecnología automática, con el fin de evaluar y hacer seguimiento a los niveles de contaminación atmosférica, generar mayor confiabilidad, temporalidad y oportunidad de las mediciones y consecuentemente, adoptar las medidas de control que sean necesarias. También se resalta en el reporte que existen zonas como en el municipio de Girón donde no se contaba con programas de monitoreo y seguimiento a la calidad del aire. En cuanto a las tendencias de los contaminantes que fueron registrados en el reporte, la mayor preocupación sigue siendo el material particulado como $PM_{2.5}$ y el PM_{10} . (IDEAM,2018)

En la Zona Metropolitana, la Corporación para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga CDMB, venía reportando que la calidad del aire urbano se ubicaba a un nivel “moderado”. No obstante, la antigüedad del Sistema de Vigilancia de la Calidad del Aire empleado en su momento y la deficiente cobertura espacial de representatividad, sumadas al bajo factor de servicio y al poco mantenimiento de la red de monitoreo, permiten deducir que los registros de campo reportados por tales estaciones, pudieron haber ofrecido una mayor confiabilidad.

Dadas las circunstancias de incertidumbre y de vacíos espacio-temporales que presentaba el sistema de Gestión Ambiental anterior, el Área Metropolitana de Bucaramanga, como nueva Autoridad Ambiental Regional, ha instalado un moderno Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire con cinco estaciones de monitoreo y un centro de recibo de la información. Su personal técnico es quien desarrolla las actividades de monitoreo y vigilancia de la contaminación atmosférica en la zona y reporta periódicamente el estado en la cual se encuentra la calidad del aire que respiramos los Bucaramanguenses.

Teniendo en cuenta la carga contaminante que actualmente recibe la población de la Zona Metropolitana de Bucaramanga, los registros históricos de calidad del aire, su crecimiento poblacional, las nuevas vías, el aumento del flujo vehicular, los reportes estadísticos sobre prevalencia de afecciones respiratorias (Secretaría de Salud Pública), es pertinente identificar una línea base sobre los nuevos factores físicos y ambientales que inciden sobre el entorno, evaluar la cobertura del SVCA actual y detectar, si los hay, nuevos factores de influencia o limitaciones de cobertura que permitan ampliar la información de campo actualmente reportada, en beneficio de una toma de decisiones más efectiva.

2. Justificación

La contaminación atmosférica es un fenómeno que afecta negativamente la salud y el bienestar del ser humano. Las actividades antropogénicas representan una contribución significativa a esta problemática, ya que son responsables de la emisión de contaminantes a través de diferentes sectores como el transporte, la industria, las obras de infraestructura, la quema programada de bosques, entre otras.

Estudios realizados por el Observatorio de Salud Pública de Santander muestran que los sistemas de transporte que utilizan combustibles fósiles, como los tracto camiones, buses, vehículos particulares y de servicio público, al igual que las motos, son los principales generadores de contaminación atmosférica en el municipio de Bucaramanga y en la zona de Floridablanca y Girón. Se ha observado también que el aporte de los establecimientos comerciales e industriales es menor. El estudio mostró, además, los resultados sobre la composición química del material particulado recogido en las zonas que fueron estudiadas, detectándose la presencia de iones cloruros, sulfatos y algunos PAH's provenientes de las fuentes móviles. (Rodríguez, L.A., et al, 2010)

Adicionalmente, los resultados del estudio del Observatorio sugieren que, en sectores donde la contaminación del aire supera los $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ la concentración de material particulado como PM_{10} , sumado a otros factores individuales (confort y salubridad de la vivienda, hábitos y estilos de vida, etc), se han convertido en un riesgo determinante para la ocurrencia de afecciones respiratorias agudas y crónicas en las personas susceptibles y las poblaciones vulnerables. (Rodríguez, L.A., et al, 2010).

Para conocer el estado de la contaminación atmosférica, determinar cuáles zonas son críticas o de mayor potencial de afectación a la salud y cuáles son los contaminantes que sobrepasan los niveles máximos permitidos en la normatividad nacional, se han implementado los programas de monitoreo y vigilancia de la calidad del aire.

Por medio de este trabajo se pretende responder a preguntas tales como: ¿Cuáles son las áreas de la ZMB potencialmente más afectadas por la contaminación atmosférica? ¿Qué contaminantes han superado históricamente los niveles máximos establecidos por la normatividad colombiana? ¿Será suficiente el número de estaciones de monitoreo actualmente activas, y su ubicación la más apropiada? ¿Cumple el sistema de vigilancia de la calidad de aire actual con los requerimientos de sus objetivos o se hace necesario una complementación del mismo?

El desarrollo de la actual propuesta apunta a presentar las consideraciones técnicas y ambientales básicas en el diseño de un SVCA para la ZMB y explorar una posible ampliación del sistema actualmente en servicio; como también, explorar la representatividad de los registros de campo a fin de reducir la contaminación y preservar la calidad del aire en el ambiente respirable de la zona.

En resumen, el modelo estructural de SVCA que se logre a través de la actual propuesta, pretende ofrecer las bases hacia un arreglo físico, cuya cobertura de monitoreo tenga la mayor representatividad para las especies contaminantes presentes en la parcela o parcelas de aire a vigilar, teniendo en cuenta su distribución a través de la zona, los registros históricos de salud ambiental, el flujo vehicular y sus rutas críticas. Se pretende, además, definir un software para evaluar la dispersión de los contaminantes emitidos hacia la atmósfera, como también las tecnologías de analizadores y/o muestreadores requeridos y las opciones de almacenamiento y recuperación de los datos.

3. Objetivos

3.1. Objetivo general

Establecer los criterios técnicos para el diseño de un sistema de monitoreo y vigilancia de la calidad del aire, previa identificación de los sectores de la Zona Metropolitana de Bucaramanga mayormente impactados, los registros de las condiciones meteorológicas y de crecimiento poblacional, las fuentes generadoras de contaminantes hacia el ambiente y las especies agresivas para la salud y la calidad de vida de sus habitantes.

3.2. Objetivos específicos

- Revisar la bibliografía relacionada con diseños de Sistemas de Monitoreo y Vigilancia de la Calidad del Aire SVCA, estado del arte y aplicaciones en el ámbito nacional y regional.
- Recopilar información sobre las condiciones geográficas y poblacionales de la ZMB, el clima, las fuentes de emisión de contaminantes al aire, los registros históricos y recientes de calidad del aire y la salud urbanos.
- Preparar línea base ambiental para la ZMB a partir de las condiciones geográficas, el clima, la calidad del aire y aspectos de salud identificados, detectar limitaciones de cobertura del actual SVCA y explorar posibles necesidades de ampliación o mejoramiento.
- Proponer un modelo estructural de SVCA cuya cobertura geográfica y su nueva escala espacial de monitoreo, incorpore los aspectos detectados a través de la línea base ambiental.

- Presentar una arquitectura modular del SVCA para la ZMB, indicando los criterios que definan el número de estaciones, su densidad espacial de localización, las especies indicativas de la calidad del aire, las tecnologías de analizadores, al igual que las opciones de almacenamiento y recuperación de los datos para el nuevo modelo o escenario geográfico por establecer.

4. Marco Referencial de los Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire SVCA

Inicialmente se deben establecer los conceptos que permitan interpretar, desarrollar y cumplir con los objetivos planteados en el presente trabajo. Este capítulo define las bases teóricas necesarias para fijar las consideraciones técnicas requeridas en el diseño de un sistema de vigilancia de la calidad del aire. A continuación, se describen los diferentes conceptos teóricos y normativos básicos a tener en cuenta:

4.1. Contaminantes Atmosféricos

Son especies químicas que alteran nocivamente la concentración normal del aire ambiente. Los contaminantes pueden ser emitidos de manera natural o derivados de las actividades del hombre. Las emisiones naturales son el resultado de los procesos de erosión del suelo, de la descomposición de materia orgánica, de incendios forestales, como también procedentes de las actividades volcánicas, entre otros procesos naturales. Las emisiones antropogénicas, en su mayoría, son el resultado de la quema de combustibles fósiles y de las actividades industriales. Los contaminantes emitidos al aire de manera directa son llamados contaminantes primarios y los que son producto

de reacciones químicas, ya sea entre los contaminantes primarios entre sí, o entre un contaminante primario y otro componente del aire, se denominan contaminantes secundarios.

Algunas especies químicas presentes en el aire han sido normatizadas por sus efectos en la salud de la población, estableciéndose límites máximos de concentración en el aire ambiente. Estos contaminantes son conocidos como *contaminantes criterio* e incluyen el ozono (O₃), el monóxido de carbono (CO), el dióxido de azufre (SO₂), el dióxido de nitrógeno (NO₂), y las partículas suspendidas menores a 10 a 2.5 o 1.0 micrómetros (PM₁₀, PM_{2.5}, PM_{1.0} respectivamente). (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, MADS, 2017)

Tabla 1. *Descripción de los contaminantes criterio*

Contaminante	Descripción	Efecto sobre la salud
Monóxido de Carbono (CO)	Gas incoloro e inodoro derivado de la quema incompleta de carburantes fósiles y biocombustibles.	Penetra en el organismo a través de los pulmones y puede provocar disminución de la capacidad de transporte de oxígeno de la sangre, con el consecuente detrimento de oxigenación de órganos y tejidos, así como disfunciones cardíacas, daños en el sistema nervioso, dolor de cabeza, mareos y fatiga; estos efectos pueden producirse tanto sobre el ser humano como sobre la fauna silvestre.
Dióxidos de nitrógeno (NO₂)	Son gases que se emiten en los procesos de combustión que se llevan a cabo en motores de fuentes móviles (vehículos automóviles, en especial de motores diésel) y el transporte en general, así como en instalaciones industriales de alta temperatura y de generación eléctrica. También es un gas tóxico, irritante y precursor de la formación de partículas de nitratos y ozono troposférico.	Inflamación de las vías aéreas, afecciones de órganos, como hígado o bazo, o de sistemas, como el circulatorio o el inmunitario, que propician a su vez infecciones pulmonares e insuficiencias respiratorias.
Ozono y oxidantes fotoquímicos (O₃)	Son derivados de reacciones secundarias complejas a partir de precursores emitidos por fuentes fijas y móviles, tales como óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles.	Originan problemas respiratorios sobre la salud humana: irritación, inflamación, insuficiencias respiratorias, asma y pueden ocasionar mortalidad prematura.

Tabla 1. (Continuación)

Contaminante	Descripción	Efecto sobre la salud
Material Particulado	Es el término utilizado para definir una mezcla de partículas sólidas y líquidas presentes en el aire. Dependiendo del tamaño éstas se clasifican en: PM10, partículas con diámetro aerodinámico igual o por debajo de 10 micras, PM2.5, partículas con diámetros igual o inferiores a 2.5 micras y PM10, partículas con diámetro igual o inferior a 1.0 micras. Las partículas de mayor tamaño (PM10) son generalmente emitidas por fuentes tales como vehículos, manipulación de materiales, operaciones de compactación y trituración, así como del polvo levantado por el viento. En cuanto a las partículas de menor tamaño (PM2.5) e inferiores, están formadas principalmente por partículas secundarias, generadas mediante procesos de nucleación y condensación de sus precursores gaseosos.	Son los contaminantes del aire más importantes en términos de peligrosidad para la salud humana, ya que pueden ser inhaladas y penetrar en el sistema respiratorio; las de menor tamaño (de 2,5 micras de diámetro, o inferior –PM2,5–) pueden incluso alcanzar los alvéolos pulmonares, lo que les permite de este modo llevar sustancias nocivas a zonas muy sensibles y agravar patologías que pueden conducir incluso a una muerte prematura. De este modo, las partículas (en especial las PM2,5) pueden estar implicadas en el incremento de la mortalidad y de la morbilidad por causas respiratorias y cardiovasculares. Además de PM10, PM2,5 y PM1.0, las partículas ultrafinas (inferiores a 0,1 micras, UFP) pueden incluso alcanzar el flujo sanguíneo y afectar por tanto a diversos órganos, al sistema nervioso central o al sistema reproductor, entre otros.
Dióxidos de Azufre (SO₂)	Es liberado en muchos procesos de combustión, ya que los combustibles como el carbón, el petróleo, el diésel o el gas natural contienen ciertas cantidades de compuestos azufrados, causante de la lluvia ácida, al transformarse a ácido sulfúrico en la atmósfera.	Causan irritación e inflamación del sistema respiratorio, al igual que afecciones e insuficiencias pulmonares, alteración del metabolismo de las proteínas, dolor de cabeza o ansiedad.

Fuente: Ministerio para la Transición Ecológica. España (<http://www.mapama.gob.es>)

Tabla 2. Contaminantes tóxicos en el aire

Contaminante	Descripción	Efecto sobre la salud
Benceno (C₆H₆)	El benceno es un líquido incoloro de aroma dulce. Se evapora al aire rápidamente y es poco soluble en agua. Es sumamente inflamable y se forma tanto de procesos naturales como de actividades humanas	Compuesto orgánico potencialmente carcinogénico que, tras ser inhalado y después de exposiciones prolongadas, puede ocasionar graves efectos sobre la salud humana, ya que afecta al sistema nervioso central y la normal producción de células sanguíneas. Puede ocasionar deterioro del sistema inmunitario y dañar el material genético celular, lo que a su vez puede originar determinados tipos de cáncer (leucemia) así como malformaciones congénitas.

Tabla 2. (Continuación)

Contaminante	Descripción	Efecto sobre la salud
Tolueno (C₆H₅CH₃ – C₇H₈)	Líquido transparente, volátil e inflamable que forma mezclas explosivas con el aire. Es un hidrocarburo de la serie aromática. Posee olor dulce e irritante característico en compuestos con anillos bencénicos. Está presente en el petróleo crudo, de donde se obtiene; también se genera en procesos de manufactura del coque a partir de carbón formando parte del alquitrán y como producto del metabolismo de árboles como el Tolú.	Afecta de forma adversa el sistema nervioso, los riñones, el hígado y el corazón. Los efectos adversos que se presentan dependen del tiempo y cantidad de exposición y pueden incluir temblores musculares, hormigueo en los dedos, fuertes dolores de cabeza, convulsiones, somnolencia, ausencia de sensaciones, pérdida de la conciencia y muerte de la persona expuesta.
Hidrocarburos Aromáticos Poli cíclicos (HAP's)	Sustancias químicas que se forman durante la incineración incompleta del carbón, el petróleo, el gas, la madera, las basuras y otras sustancias orgánicas, como el tabaco y la carne asada al carbón. Se encuentran generalmente como mezclas complejas, por ejemplo, como parte de productos de combustión como el hollín.	En ciertas circunstancias, los HAPs pueden ser dañinos para la salud. Varios HAPs, entre los que se incluyen benzoantraceno, benzopireno, benzo[b]fluoranteno, benzo[j]fluoranteno, benzo[k]fluoranteno, criseno, dibenzo[a,h]antraceno e indeno[1,2,3-c,d]pireno, han causado tumores en los animales de laboratorio que han respirado estas sustancias en el aire, que las han consumido o que han entrado en contacto con las mismas a través de la piel durante largos períodos de tiempo. Los estudios realizados en los seres humanos demuestran que las personas expuestas a través de la respiración o el contacto de la piel durante largos períodos de tiempo con mezclas que contienen HAPs y otros compuestos también pueden contraer cáncer.

Fuente: ATSDR, Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (<https://www.atsdr.cdc.gov/>)

4.2. Norma Nacional de calidad del aire

La calidad del aire se define como el estado en el cual se encuentran las concentraciones de los diferentes contaminantes atmosféricos, referidas a un periodo de tiempo y un lugar determinados (CDMB, 2015).

A continuación, se presentan algunos estándares de calidad del aire ambiental correspondientes a otros países, los cuales han sido tomados como comparativos para los de nuestro país. (Green, J. & Sánchez, S., 2013):

Tabla 3. Normas de Calidad del Aire para Algunos Países

Contaminante	PM _{2.5} (µg/m ³)		PM ₁₀ (µg/m ³)		Ozono (µg/m ³)				SO ₂ (µg/m ³)		NO ₂ (µg/m ³)				CO (µg/m ³)	
	24h	Anual	24h	Anual	1h	8h	Anual	10min	3h	24h	1h	1h	24h	Anual	1h	8h
Estados Unidos	35 _a	12 ^b	150	-	-	147 _c	-	-	1310	-	197	188 _a	-	100	40	10
Unión Europea	-	25 ^b	50 ^d	40	-	120	-	-	-	125 _e	350 ^f	200 _g	-	40	-	10 ^h
									1h	3h	24h	anual				
México	65	15	120	50	216	157	-	524	-	288	66	395	-	100	-	13
Colombia	50	25	100	50	120	80	-	-	750	250	80	200	150	100	40	10
Perú	50	-	150	50	-	120	-	-	-	80	-	200	-	100	30	10
Chile	50	20	150	50	-	120	-	-	-	250	80	400	-	100	30	10

Nota: a Percentil 98 del promedio de 3 años; b promedio de 3 años; c promedio de 3 años, del cuarto valor anual más alto del promedio máximo diario de 8 horas; d 35 excedencias permitidas; e 3 excedencias permitidas; f 24 excedencias; g 18 excedencias permitidas; h 25 días de excedencia permitida en 3 años.

Fuente: Clean Air Institute.

La norma de calidad del aire para Colombia se fundamenta en la Resolución 2254 del 2017 la cual ha sido emitida por el MADS. En ella se establecen los valores límite, tanto para los

contaminantes criterio como para los contaminantes tóxicos. A continuación, se muestran los respectivos valores de norma:

Tabla 4. *Norma Nacional de Calidad del Aire para los Contaminantes Criterio*

Contaminante	Periodo	Norma nacional	Unidad
Partículas Suspendidas PM10	24 horas	100	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
Partículas Suspendidas PM2.5	24 horas	50	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
Óxidos de Azufre, SO₂	24 horas	50	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
Óxidos de Nitrógeno, NO₂	1 hora	200	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
Monóxido de Carbono, CO	1 hora	35.000	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
Oxidante Fotoquímico O₃	8 horas	100	$\mu\text{g}/\text{m}^3$

Fuente: Resolución 2254 de 2017, Min Ambiente y Desarrollo Sostenible

Tabla 5. *Norma de Calidad del Aire para Contaminantes Tóxicos*

Contaminante Tóxico	Nivel máximo Permisible ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Tiempo de Exposición
Benceno	5	Anual
Plomo y sus Compuestos	0,5	Anual
Cadmio	0,005	Anual
Mercurio Inorgánico (Vapores)	1	Anual
Tolueno	260	1 semana
	1000	30 minutos
Níquel y sus Compuestos	0,180	Anual
Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos expresados como Benzo (a) pireno	0,001	Anual

Fuente: (Colombia. Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. Resolución 2254, 2017)

4.3. Indicadores de Calidad de Aire

En las estaciones de monitoreo, que son parte fundamental de los sistemas de vigilancia de la calidad del aire, se obtienen los registros de las concentraciones horarias de los contaminantes en

diversas unidades de medida, las cuales se divulgan a la comunidad a través de un indicador que permita visualizar de manera sencilla, el grado de contaminación del aire en los niveles y colores, según la afectación a la salud humana. Para el caso de la ciudad de Bucaramanga, durante la jurisdicción de la CDMB, el indicador se conocía como IBUCA (Índice para Bucaramanga de la calidad del aire). Actualmente el AMB, como autoridad ambiental encargada de la gestión del recurso aire para la región, realiza los reportes a la comunidad como ICA (Índice de Calidad del Aire) de acuerdo con los criterios de medición expuestos en la normatividad vigente. (Ver tabla 6).

Para Colombia, el índice de calidad del aire corresponde a un valor unidimensional que oscila entre 0 y 500. A través de este rango se pueden analizar los efectos de la contaminación sobre la salud y tomar las acciones preventivas que sean necesarias. (Ver tabla 6).

Tabla 6. *Punto de Corte ICA a nivel nacional*

Ica	Color	Clasificación	O ₂ 8h ppm	O ₂ 1h ppm	PM ₁₀ 24h µg/m ³	PM _{2.5} 24h µg/m ³	CO 8h ppm	SO ₂ 24h ppm	NO ₂ 8h ppm
0 – 50	Verde	Buena	0.000	-	0	0.0	0.0	0.000	-
			0.059		54	15.4	4.4	0.034	
51 – 100	Amarillo	Moderada	0.060	-	55	15.5	4.5	0.035	-
			0.075		154	40.4	9.4	0.144	
101 – 150	Naranja	Dañina a la salud para grupos sensibles	0.076	0.125	155	40.5	9.5	0.145	-
			0.095	0.164	254	65.4	12.4	0.224	
151 – 200	Rojo	Dañina a la salud	0.096	0.164	255	65.5	12.5	0.225	-
			0.115	0.204	354	150.4	15.4	0.304	
201 – 300	Púrpura	Muy dañina a la salud	0.116	0.205 0.404	355 424	150.5 250.4	15.5 30.4	0.305 0.604	0.65 1.24
			0.374						
			(0.155						
			0.404)						
			-						

Tabla 6. (Continuación)

Ica	Color	Clasificación	O ₂ 8h ppm	O ₂ 1h ppm	PM ₁₀ 24h µg/m3	PM _{2.6} 24h µg/m3	CO 8h ppm	SO ₂ 24h ppm	NO ₂ 8h ppm
301 – 400	Marrón	Peligrosa	-	0.405 0.504	425 504	250.5 350.4	30.5 40.4	0.605 0.804	1.25 1.64
401 – 500	Marrón	Peligrosa	-	0.505 0.604	505 604	350.5 500.4	40.5 50.4	0.805 1.004	1.65 2.04

Fuente: CDMB – ZMB

4.4. Métodos de medición de la calidad del aire

La medición de los contaminantes atmosféricos se puede lograr a través de diversos métodos, los cuales pueden agruparse según el principio o tecnología de medición, como se muestra en la siguiente tabla (Instituto Nacional de Ecología – INE México, Manual 3):

Tabla 7. Métodos de Medición de la Calidad del Aire

Método	Descripción	Ventajas	Desventajas
Muestreo Pasivo	Se colecta el contaminante por adsorción o absorción en un sustrato químico. La muestra se lleva al laboratorio para análisis.	Operación simple y a bajo costo	Sólo para algunos contaminantes y resultados solo estimativos.
Muestreo con Bioindicadores	Implica usar especies vivas (vegetales o plantas) donde su superficie es receptora del contaminante.	Bajo costo. Identifican presencia y efectos de algunos contaminantes.	Métodos y procedimientos poco estándar.
Muestreo Activo	Captura el aire contaminado por medio de colección físico o químico, burbujeadores o impactadores.	Fácil de operar, muy confiables y costo relativamente bajo.	Entregan promedios de muestreo de 24 horas; requieren análisis de lab.
Método Automático	Eficientes y prácticos. Permiten mediciones continuas, Se muestrean los Contaminantes criterio, tóxicos y/o VOC's.	Entregan valores en tiempo real, alta resolución. Detección de picos en tiempo real.	Alto costo. Requieren personal capacitado para mantenimiento y operación. Calibración constante.

Tabla 7. *(Continuación)*

Método	Descripción	Ventajas	Desventajas
Método Óptico de percepción remota	Utilizan la espectroscopia de haces de luz a cierta longitud de onda a través de la atmósfera y miden la energía absorbida. Dan mediciones integradas por multi componentes, a lo largo de una trayectoria.	Valores en tiempo real, alta resolución; útiles para mediciones de emisiones de fuentes específicas.	Costo de adquisición muy elevado; requieren personal altamente capacitado para su operación y calibración.

Fuente: INE: Manual 1. Principios de Medición de la Calidad del Aire

4.5. Monitoreo a través de los SVCA

El propósito más importante del monitoreo de la calidad del aire es generar la información necesaria a científicos, legisladores y planificadores urbanos para gestionar en pro del recurso aire y mejorar el medio ambiente.

La presión ejercida por la comunidad científica y la sociedad en general, al igual que una legislación ambiental más estricta, han requerido de información imparcial y confiable sobre la calidad del aire (Molina y Molina, 2001).

Para llevar a cabo el monitoreo de calidad del aire se utilizan diversos equipos, ya sean analizadores, monitores o sensores que se ubican en un espacio físico confinado denominado estación de monitoreo. Un grupo de estaciones conforma una red de monitoreo de la calidad del aire, que, integrada con las estaciones de meteorología y el centro de recibo y transmisión de datos, suministran la información a usuarios. El conjunto descrito conforma el sistema integrado de medición de la calidad del aire. (Instituto Nacional de Ecología – INE México, Manual 2).

4.6. Escala de monitoreo para un SVCA

Con el propósito de cumplir con los objetivos de gestión de la calidad del aire, es necesario definir un espacio físico para realizar, in situ, el monitoreo respectivo y posteriormente establecer un vínculo entre la representatividad espacial del contaminante disperso en la zona, con el área geográfica pre definida para localizar los monitores. Tal vínculo se define a través del concepto denominado *escala espacial de representatividad*. Este concepto se expresa en términos de las dimensiones físicas de la parcela de aire más cercana al sitio de monitoreo, a través del cual las concentraciones reales del contaminante son razonablemente similares. (USEPA, s.f.).

Las escalas espaciales que se presentan a continuación se desarrollaron con base en la literatura internacional y se corrigieron de acuerdo con los tamaños de los centros urbanos colombianos. (MADS, 2010)

Tabla 8. *Escalas espaciales de monitoreo para SVCA*

Escala	Descripción	Escala
Micro	Áreas como cañones urbanos o corredores de tráfico altamente contaminados con emisiones de fuentes móviles o puntuales. Para estudios puntuales de un grupo de fuentes y receptores específicos o estudios epidemiológicos.	2 m – 100 m
Media	Representa concentraciones típicas de zonas limitadas en un área urbana.	100 m – 0.5 Km
Vecindario	Las mediciones en esta categoría pueden representar las condiciones en un área específica al interior de una zona urbana.	0.5 Km – 4 Km
Urbana	Condiciones de un área urbana.	4 Km – 20 Km
Regional	Áreas rurales o conjunto de áreas urbanas y rurales. Incluye la interacción de varias jurisdicciones de diferentes autoridades ambientales.	Más de 20 Km hasta el área total de la jurisdicción.
Nacional	Estudio del país. Incluye la integración de varios SVCA y jurisdicciones de diferentes autoridades ambientales.	Todo el país.

Fuente: Manual de Diseño de SVCA – MADS.

4.7. Estaciones de Monitoreo

Son casetas en metal u otro material resistente a la intemperie, acondicionadas para ubicar en su interior los equipos analizadores, sensores meteorológicos y demás aditamentos de apoyo, destinados a monitorear uno o más contaminantes y/o parámetros meteorológicos. Su finalidad es evaluar la calidad del aire para un área determinada. En la actualidad los shelters o casetas de monitoreo, se han venido reemplazando por unidades o paquetes compactos de menor tamaño, menor peso y tecnológicamente más avanzados, conformados por uno, dos o varios analizadores, según los requerimientos del lugar.

4.8. Sistemas de medición y algunas aplicaciones de SVCA.

Los sistemas de medición son estructuras de redes conformadas por varias estaciones distribuidas geográficamente a lo largo y ancho de la superficie territorial a monitorear. Estas estructuras están destinadas a medir, registrar y procesar información sobre la calidad del aire. Como se mencionó antes, están constituidas por monitores individuales, estaciones o paquetes compactos de analizadores continuos automáticos o semi automáticos, muestreadores manuales, estaciones meteorológicas, sistemas de transmisión de datos, centro de control, laboratorio y talleres.

Ahora bien, teniendo en cuenta el documento Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire desarrollado por el MADS, se establecen seis tipos de Sistemas de Vigilancia que pueden adaptarse a las condiciones de población, territorio, condiciones ambientales de la zona y objetivos específicos del programa de vigilancia.

Tabla 9. *Tipos de SVCA*

Tipo de SVCA	Aplicación
SVCA Tipo I: Indicativo	Aplica a poblaciones de 50.000 a menos de 150.000 habs sin problemas ambientales identificados (no zonas industriales, mineras u otras fuentes) o no se tenga quejas.

Tabla 9. (Continuación)

Tipo de SVCA	Aplicación
SVCA Tipo II: Básico	En poblaciones entre 150.000 y 500.000 hab. Poblaciones hasta de 300.000 habitantes sin problemas de calidad del aire podrán utilizar criterios del SVCA Indicativo.
SVCA Tipo III: Intermedio	Poblaciones o zonas metropolitanas entre 500.000 habs y 1.500.000. Poblaciones integradas al área metropolitana serán analizadas como un conjunto.
SVCA Tipo IV: Avanzado	Para zonas metropolitanas mayores a 1.500.000 habs. Para poblaciones distantes del centro urbano, se deberá hacer un diseño separado.
SEVCA – Sistemas Especiales de Vigilancia de la Calidad del Aire	En poblaciones de cualquier número de habitantes cerca a grandes fuentes industriales o grupo de poblaciones con cualquier número de habitantes ubicadas bajo la influencia de fuentes de gran magnitud.
SVCAI – Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire Industrial	Actividades que como requerimiento de la autoridad ambiental deban realizar mediciones de calidad del aire. Este tipo de SVCA podrá ser indicativo o fijo, dependiendo de las exigencias de la autoridad ambiental.

Fuente: Manual de Diseño de SVCA – MADS

A continuación, se mencionan algunos de los SVCA implementados a nivel nacional y en algunas ciudades de América Latina.

1. Sistemas de Monitoreo Nacionales

- *Red Área Metropolitana del Valle de Aburrá*

La red de monitoreo de calidad del aire del Valle de Aburrá es administrada por el Área Metropolitana del valle del mismo nombre, y su operación se encuentra a cargo de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, está conformada por estaciones automáticas, semi automáticas y manuales, que miden los principales contaminantes atmosféricos. Durante los 2 últimos años la distribución geográfica y la instrumentación de cada estación, ha sido adaptada,

teniendo en cuenta los criterios que a través de los resultados del estudio de optimización de la red se han obtenido, con el apoyo de las entidades integrantes del convenio marco REDAIRE. Actualmente se poseen 22 sitios fijos de medición, distribuidos en los diferentes municipios que conforman el Valle de Aburrá. En total, se cuenta con un medidor de partículas suspendidas totales (PST), 18 equipos medidores de partículas menores de 10 micrómetros (PM_{10}), 8 medidores de partículas menores a 2.5 micrómetros ($PM_{2.5}$), un medidor de partículas menores a un micrómetro ($PM_{1.0}$), 3 medidores automáticos de Monóxido de Carbono (CO), 8 medidores automáticos de Ozono (O_3), 5 medidores automáticos de óxidos de nitrógeno (NO_x), un medidor automático de dióxido de azufre (SO_2) y 14 estaciones meteorológicas. (AMVA, 2014)

Mediante el Convenio No. 256 de 2013, celebrado entre el Área Metropolitana del Valle de Aburrá y la Universidad Pontificia Bolivariana, entidad con amplia experiencia y conocimientos sobre la problemática de contaminación atmosférica, se buscó brindarle apoyo al Área Metropolitana, a partir de la implementación del Sistema Inteligente de Gestión para el Manejo de la Calidad del Aire -SIGMA-, el cual tiene entre sus objetivos específicos, facilitar el acceso a la información de calidad del aire, dar respuesta a solicitudes de la comunidad relacionada con los niveles de contaminación en zonas específicas y elaborar informes de los datos arrojados por la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire. La Figura 1 es una visualización en pantalla de la red de calidad del aire mencionada.

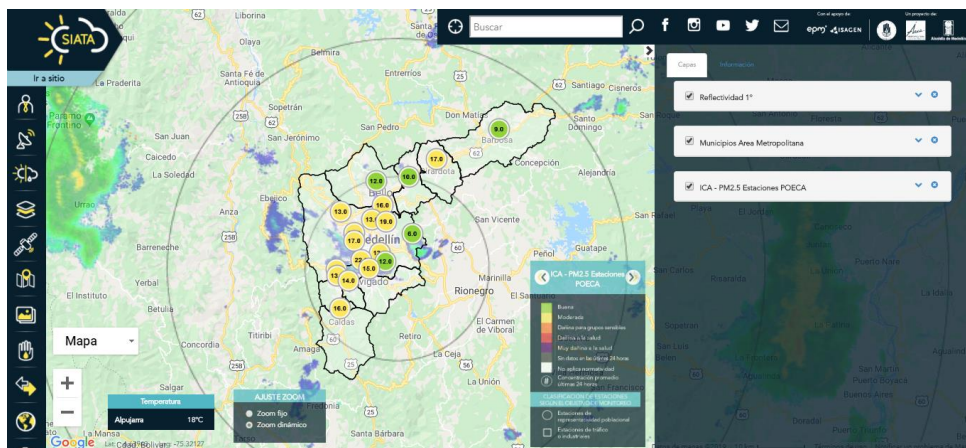


Figura 1. Red de Calidad de Aire en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá

Fuente: SIATA (https://siata.gov.co/siata_nuevo/)

2. Sistemas de Monitoreo de algunos países en Latinoamérica

• Sistema de Monitoreo de la Zona Metropolitana del Valle de México

En la Ciudad de México, el Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT) es el responsable de la medición permanente de los principales contaminantes del aire, el cual ofrece una manera de proteger la salud de la población a través del monitoreo y apoyar la gestión de la calidad del aire. La Figura 2 corresponde a una visualización en pantalla de la distribución geográfica de la red de monitoreo de la Zona Metropolitana del Valle de México.



Figura 2. Dirección de Monitoreo Atmosférico página oficial

Fuente: SIMAT - <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php>

El SIMAT cuenta con más de 40 sitios de monitoreo distribuidos en el área metropolitana, comprendiendo demarcaciones del Distrito Federal y la zona conurbana del Estado de México. La mayoría de los sitios utilizan equipos continuos para realizar la medición de los contaminantes requeridos por la normatividad federal: dióxido de azufre, monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno, ozono y partículas suspendidas. En algunos de ellos se realizan también mediciones continuas de las principales variables meteorológicas de superficie, incluyendo la radiación solar ultravioleta. En el resto se utilizan equipos manuales para la recolección de muestras de partículas suspendidas. (Dirección de Monitoreo Atmosférico, s.f.)

Para desarrollar la labor de medición de la calidad del aire que realiza el SIMAT, éste posee equipos especializados, personal con conocimientos y experticia para su operación e infraestructura de soporte y comunicación a la comunidad, acorde con las necesidades.

- *Sistema de Información Nacional de la Calidad del Aire (Chile)*

El Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA) del Ministerio de Medio Ambiente pone a disposición información de calidad de aire de todo el país, buscando mejorar gradualmente el conocimiento, la vigilancia y la gestión de la calidad del aire se respira en Chile.

En este Portal se encuentra información sobre:

- Mediciones de calidad del aire en línea.
- Seguimiento histórico de las mediciones de calidad del aire y meteorología.
- Antecedentes de las estaciones de monitoreo.
- Documentación relacionada con calidad de aire y monitoreo.
- Enlaces a sitios Web de interés, nacionales e internacionales.

A través de SINCA, el Ministerio del Medio Ambiente impulsa la estandarización de procedimientos asociados al monitoreo y al reporte de información y promueve la centralización de la información con el objeto de optimizar los recursos disponibles. Durante los últimos años, se han desarrollado varias líneas de acción, todas ellas orientadas a mejorar la calidad de la información de monitoreo, destacándose:

- Elaboración de procedimientos y protocolos para el monitoreo de contaminantes atmosféricos.
- Evaluación a las redes de monitoreo instaladas en el país.
- Desarrollo del Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire SINCA, sustentado en el software AIRVIRO, que permite el manejo de grandes volúmenes de información de todas las redes del país y la conexión a otros sistemas y redes de monitoreo. A continuación, se presenta el portal del Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire de Chile.

(Ministerio del Medio Ambiente Gobierno de Chile, s.f.)



Figura 3. Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire – Chile

Fuente: SINCA (<https://sinca.mma.gob.cl/>)

5. Aspectos y condiciones geográficas, ambientales y de salud de la zona objetivo

Para montar un SVCA se requiere primeramente conocer las condiciones de la zona de estudio. Como se mencionó antes, la zona de interés del presente trabajo es la Zona Metropolitana de Bucaramanga. En consecuencia, es necesario conocer los aspectos y condiciones geográficas, ambientales y de salud que influyen en la calidad del aire urbano.

Tal como se cita en la definición de Área Metropolitana “ Entidades Administrativas de derecho público, formadas por un conjunto de dos o más municipios integrados alrededor de un municipio núcleo”, el Área Metropolitana de Bucaramanga es un territorio conformado por 4 municipios: Bucaramanga, Floridablanca, Piedecuesta y Girón, con un área superficial de

160.311,24 hectáreas (ver figura 4) y una población aproximada de 1.160.243 habitantes (ver figura 5), siendo la quinta aglomeración urbana más poblada del país. Los cuatro municipios se encuentran vinculados entre sí por dinámicas e interrelaciones territoriales, ambientales, económicas, sociales, demográficas, culturales y tecnológicas, desarrollando a su vez, relaciones socio económicas y ambientales entre las poblaciones pertenecientes a cada uno de los municipios del territorio metropolitano. (Plan de desarrollo Metropolitano AMB, 2019).

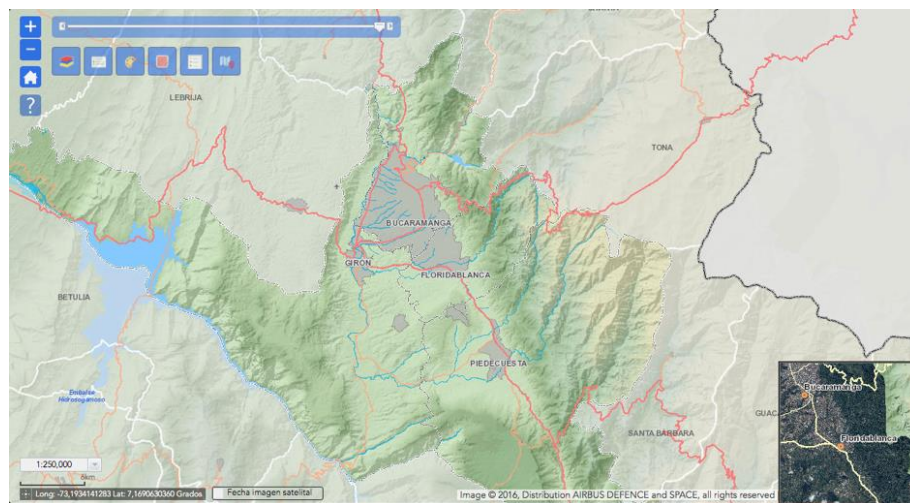


Figura 4. Zona comprendida por el Área Metropolitana de Bucaramanga

Fuente: <https://visor.amb.gov.co/visor/>

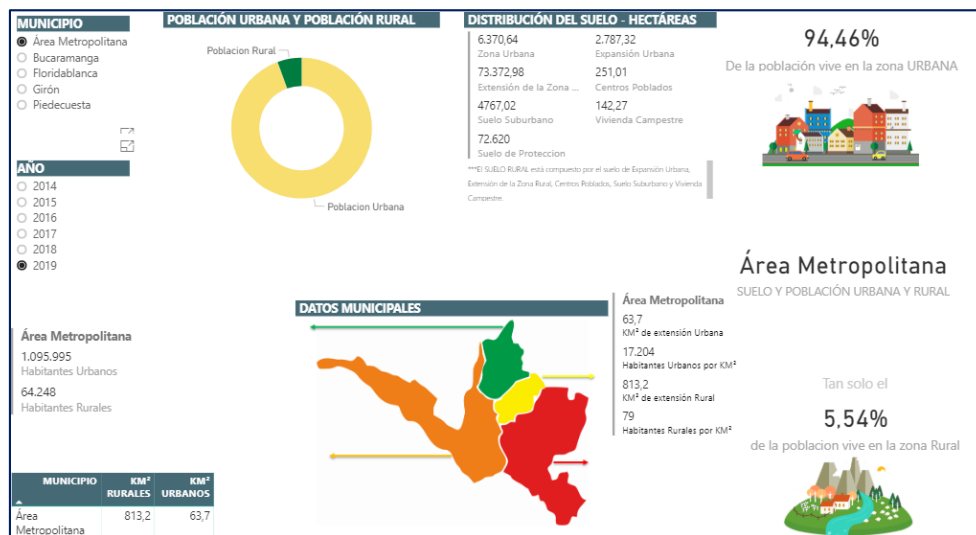


Figura 5. Distribución Poblacional y Extensión Territorial de la Zona Metropolitana de Bucaramanga

Fuente: <http://www.observatoriometropolitano.com.co:8080/Indicador/Index/8>

Es importante aclarar que la zona urbana de los municipios de Bucaramanga, Floridablanca, Girón, Piedecuesta y Tona, pertenecen a la subcuenca del Río de Oro, que presenta un área de 56.940 hectáreas y hace parte de la zona hidrográfica del Magdalena Medio, lo que influye directamente en las condiciones ambientales a las que la ZMB se encuentra expuesta.

5.1. Meteorología Local

5.1.1. Precipitación. La Zona Metropolitana de Bucaramanga presenta un régimen de precipitación anual de tipo bimodal, con dos temporadas de lluvia y dos de sequía. La primera temporada lluviosa del año es la más intensa con el 29.7% del total, mientras que, en la segunda las lluvias alcanzan aproximadamente un 20.1%. Los meses más lluviosos del año son marzo, abril

y octubre. El promedio anual de precipitación es de 1.253 mm en 188 días. El período de menos lluvia está comprendido entre los meses de noviembre a marzo, con solo 10 o 15 días. (IDEAM)

La siguiente tabla describe el régimen de lluvias: el color amarillo representa las temporadas secas, el color gris describe las menores precipitaciones del mes, el color azul claro, las temporadas de lluvias y el azul oscuro, los meses de mayor precipitación.

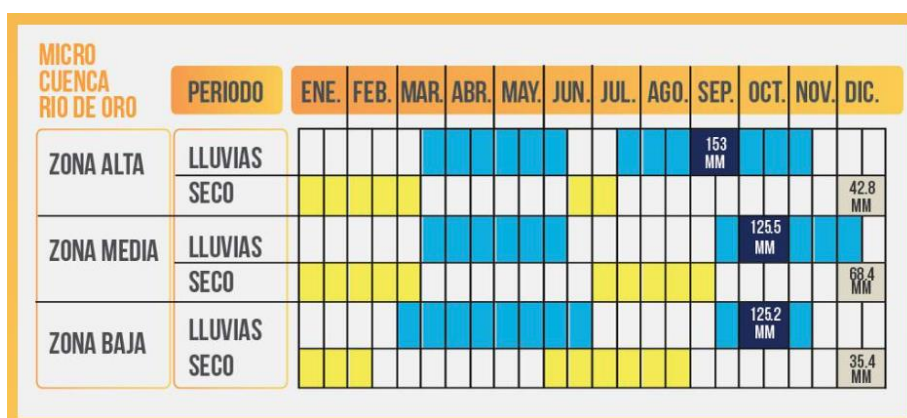


Figura 6. Reporte precipitaciones cuenca Río de Oro

Fuente: Observatorio del Área metropolitana de Bucaramanga

5.1.2. Temperatura. La temperatura media de la zona del Área Metropolitana presenta un comportamiento uniforme a lo largo del año, con variaciones del orden de 1°C entre los meses más cálidos o los más fríos con fluctuaciones anuales entre los 22.3°C en noviembre y los 23.4° C en marzo. Las temperaturas extremas fluctúan entre 14°C (mínima) y 34°C (máxima) y un promedio anual de 23°C. (IDEAM)

Tabla 10. Descripción Variación de la Temperatura en el AMB

Micro Cuenca	Ambiente	Temperatura °C			Meses más fríos
Zona Alta	Muy frío	8,3	16,8	22,5	Nov, Dic, Ene

Tabla 10. (Continuación)

Micro Cuenca	Ambiente	Temperatura °C			Meses más fríos
Zona Media	Frio	17,5	23,0	30,5	Dic, Ene
Zona Baja	Cálido y Semi Cálido	22,9	24,9	26,7	Dic, Ene

Fuente: Plan Integral de Desarrollo Metropolitano 2016 - 2026

Tabla 11. *Temperatura Promedio por Municipios*

Municipio	Altura sobre el nivel del mar	Temperatura promedio
Bucaramanga	959 m	23 °C
Florida	925 m	23 °C
Municipio	Altura sobre el nivel del mar	Temperatura promedio
Girón	777 m	24,5 °C
Piedecuesta	1005 m	22 °C

Fuente: Plan Integral de Desarrollo Metropolitano 2016 - 2026

5.1.3. Humedad Relativa. La humedad relativa promedio para la Estación El Rasgón es de 83 %, con un régimen de oscilación entre el 79 % y el 86 %. Los registros de humedad relativa en la Estación UIS oscilan entre el 69 % y el 90 % con un promedio de 82%. Según datos de la Estación Llano Grande, la humedad relativa promedio para la microcuenca Oro Medio es de 78 %, con una oscilación promedio entre 76 % y 79 %.

5.1.4. Vientos. La velocidad de los vientos locales como su dirección, son los parámetros meteorológicos de mayor incidencia en la contaminación atmosférica urbana. Las lluvias también son importantes, dado que eventualmente favorecen el lavado de la baja atmósfera.

De mediciones realizadas por las estaciones hidrometeorológicas del SVCA se estima que para la ZMB prevalecen los vientos de intensidad débil con un valor anual medio de 1.8 m/seg y dirección Norte y Nor-Oriente. (IDEAM)

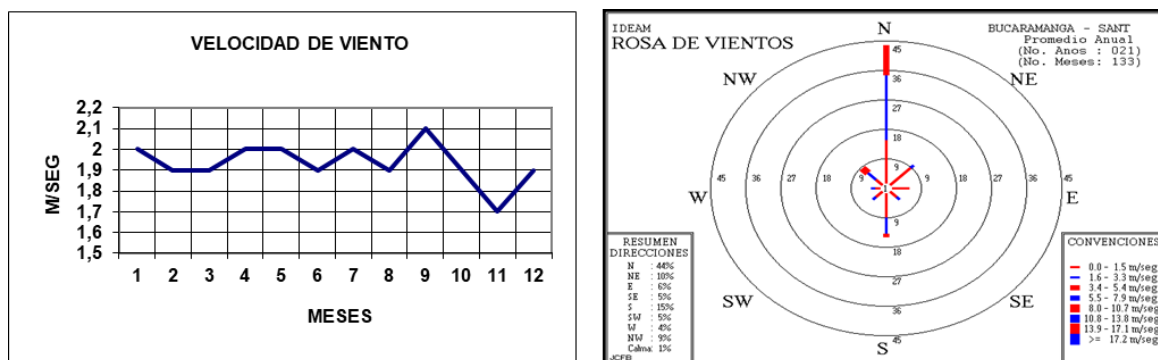


Figura 7. Velocidad y Rosa de Vientos.

Fuente: IDEAM

5.2. Usos del suelo

La expresión *Uso del suelo* se define como "las acciones, actividades o intervenciones que realizan las personas sobre un determinado tipo de superficie de terreno para que produzca, pueda ser modificada o solo para mantenerla" (FAO, 1997a; FAO/UNEP, 1999). La imagen 8 describe los usos del suelo que para la ZMB y en la tabla 12 se puede observar la extensión en hectáreas de dichos usos.

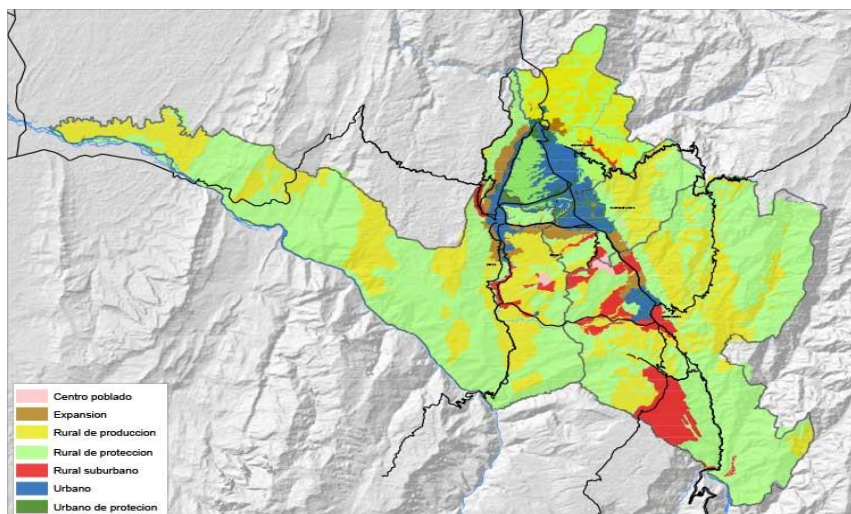


Figura 8. Usos de suelo AMB.

Fuente: Observatorio del Área Metropolitana de Bucaramanga

Tabla 12. Descripción del uso del Suelo por Municipio

Usos del suelo [Ha]		B/ga	Girón	Florida	P/cuesta	Total	%
Urbano	Zona Urbana	2.918,69	1.132,68	1.519,47	799,80	6.370,64	4,0
	Expansión urbana	168,49	1.622,46	665,03	331,34	2.787,32	1,7
	Extensión de Zona Rural	5.064,57	48.457,71	7.582,75	12.267,95	73.372,98	45,8
Rural	Suelo Suburbano	17,69	-	-	4.749,33	4.767,02	3,0
	Vivienda Campestre	142,27	-	-	-	142,27	0,1
	Centros Poblados	-	149,57	101,44	-	251,01	0,2
	Suelo de Protección	6.900	30.383	4.554	30.783	72.620	45,3
Total		15.211,71	81.742,42	14.422,69	48.931,42	160.311,24	100%

Fuente: Observatorio del Área metropolitana de Bucaramanga

5.3. Fuentes e Inventario de emisiones

5.3.1. Fuentes de emisión. Las fuentes de emisión de material contaminante hacia la Zona Metropolitana pueden clasificarse en: fuentes fijas, móviles y naturales. Las fuentes fijas se encuentran situadas en un lugar determinado e inamovible como chimeneas y eventualmente, obras de construcción; a las móviles, corresponden principalmente los vehículos cuyas emisiones se derivan de la quema de combustibles en los motores de combustión interna y a nivel urbano, cabe destacar las fuentes biogénicas dentro de las naturales.

5.3.1.1. Fuentes Fijas. La autoridad ambiental encargada del monitoreo de la calidad del aire realiza de forma periódica el seguimiento y control a todas aquellas fuentes fijas que descargan los contaminantes al aire, ya sea que posean o no el permiso respectivo.

En la imagen 9 se muestra el número de fuentes fijas de los municipios de la Zona Metropolitana que a 2017 cuentan con permiso ambiental vigente.

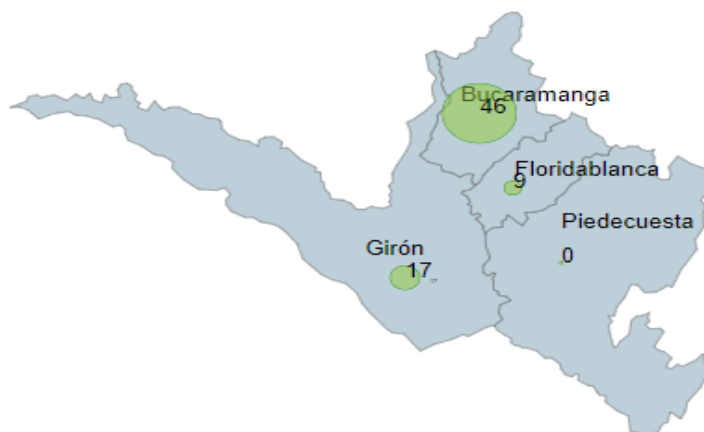


Figura 9. Número de Empresas que poseen fuentes fijas por sector Municipal. Año 2017

Fuente: Observatorio del Área metropolitana de Bucaramanga. 2017

Las fuentes fijas en la ZMB se clasifican de acuerdo con las siguientes nominaciones:

- BAT - Bebidas, Alimentos y Tabaco (incluidos alimentos para animales)
- CVL - Cerámicos y Vítreos; ladrilleras, alfareras, tejares e industrias de cerámica.
- PAP - Papel, Cartón, Pulpa e Impresión.
- PCE - Plásticos, Cauchos y Empaques; incluidas reencauchadoras, fabricación y procesamiento de llantas.
- MMC - Metalmecánico; Fundición y manejo de metales, hierro, metales no ferrosos, producción de maquinaria eléctrica y no eléctrica.
- QMC - Química; Producción de compuestos químicos, producción de jabones y detergentes, pinturas y resinas.
- CUR - Cueros; curtiembres y calzado.
- ASF - Derivados del petróleo; Producción y procesamiento asfaltos y emulsiones asfálticas, explotación y tratamiento de triturados.
- TER - Terciario; sector terciario, comercial y de servicios que por su actividad posean calderas u hornos eléctricos (hoteles, hospitales, cementerios, lavanderías y otros).
- MAD - Aserriós, depósitos de maderas, e industrias que trabajan la madera.
- OTR - Otras Industrias. En este sector se agrupan las industrias que no se pueden clasificar según ninguna de las anteriores clasificaciones. Se incluye la industria generadora de energía y la minería de oro y minerales metálicos.

A continuación, se muestran las empresas de la Zona Metropolitana según el sector productivo al cual pertenecen. El municipio con mayor número de fuentes fijas es Bucaramanga, donde también se concentra el mayor número de habitantes:

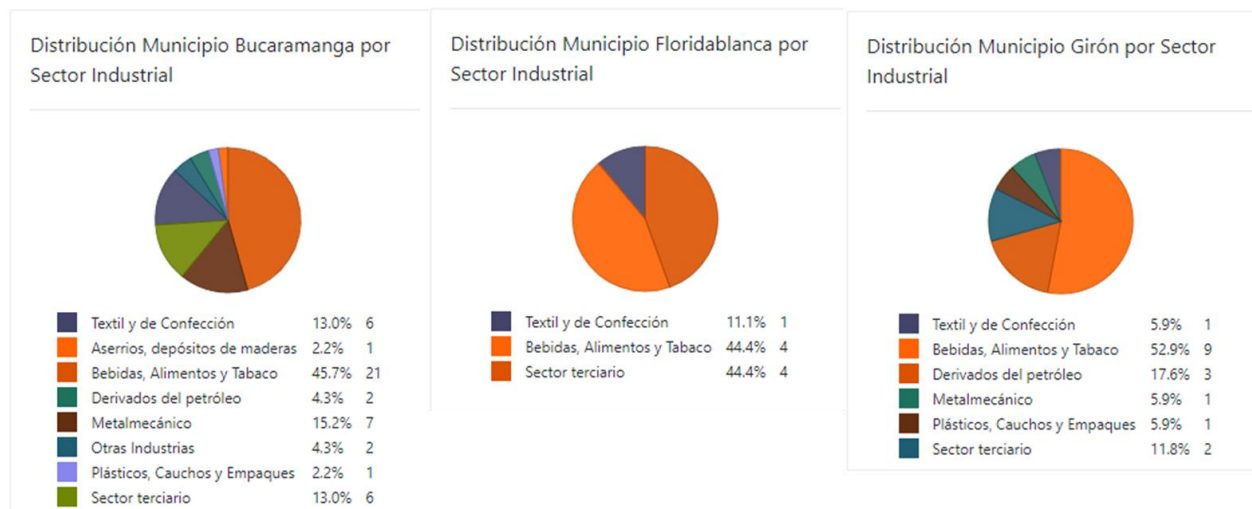


Figura 10. Distribución por Sector Industrial y Municipio

Fuente: Observatorio del Área metropolitana de Bucaramanga. 2017

Teniendo en cuenta los sectores industriales y el análisis de las emisiones de cada uno de ellos, el sector con mayor incidencia en la afectación de la calidad del aire es el de bebidas, alimentos y tabaco (BAT), como se muestra en la siguiente figura:

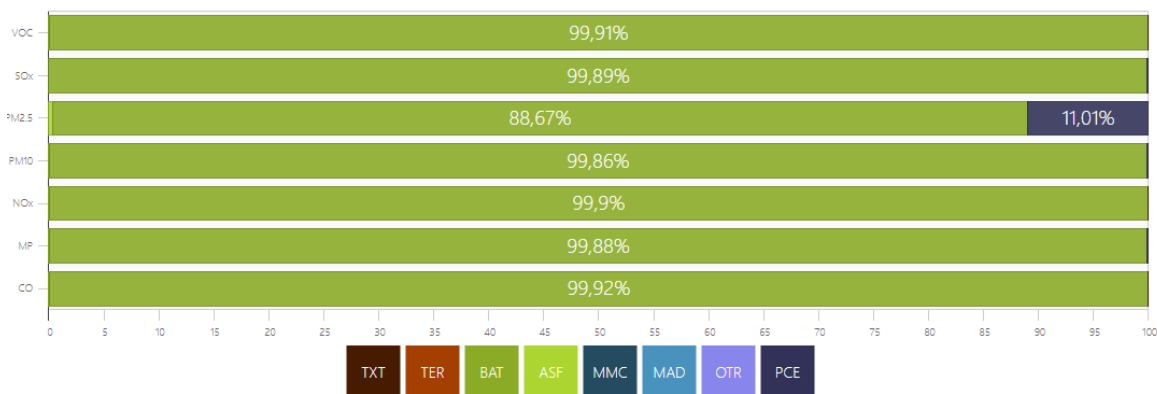


Figura 11. Distribución de las emisiones de fuentes por sector 2017 [unidades en Mg/año]

Fuente: Observatorio del Área metropolitana de Bucaramanga. 2017

5.3.1.2. Fuentes móviles. Si bien las fuentes fijas generan impacto por contaminación atmosférica en la Zona Metropolitana, las fuentes móviles son las que ocasionan un impacto mayor

en dicha zona. Un factor que favorece esta situación es la compleja malla vial que intercomunica los cuatro municipios de la zona, sumado al tráfico intermunicipal creciente y el tránsito continuo de tracto camiones y vehículos pesados hacia la Costa Atlántica y el oriente del país.

Cabe reiterar que vías como la denominada Autopista a Bogotá o Autopista Sur y la vía antigua son vitales para el normal transcurrir de los habitantes de los municipios de la Zona Metropolitana, por lo que frecuentemente es utilizada para desplazarse entre los dos municipios o más hacia el sur por diferentes motivos, sean estos de carácter laboral, social o por motivo de estudio (Ver Figura 12).

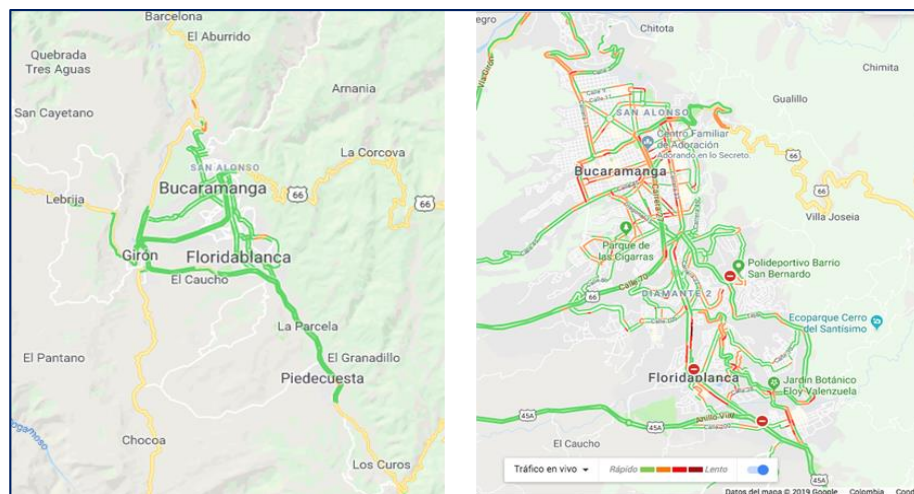


Figura 12. Infraestructura Vial

Fuente: Google Maps

Según el inventario de tráfico 2009 la vía “Bucaramanga- Girón” es menos transitada que la “Autopista Sur”. En el caso particular de la comunicación entre Floridablanca y el municipio de Girón, según el POT de Bucaramanga, el anillo vial externo metropolitano (vía de comunicación alternativa) presenta un bajo uso por parte de los automotores particulares y es utilizado preferiblemente por vehículos de paso por la ciudad y por el reparto interno de carga. Otro caso se presenta en la Calle 45 entre la Meseta de Bucaramanga y el sector de Chimitá con un alto flujo

vehicular de motocicletas y camiones de carga. En la tabla 13 se puede evidenciar el flujo vehicular entre los distintos municipios que conforman la ZMB.

Tabla 13. *Flujos Vehiculares del AMB.*

Flujo vehicular Bucaramanga - Floridablanca			Flujo vehicular Floridablanca - Bucaramanga		
Tipo	Tráfico todo el día	Hora pico (11:45 – 12:45)	Tipo	Tráfico todo el día	Hora pico (11:45 – 12:45)
Autos	30.342	2.260	Autos	30.342	1.981
Buses	3.342	217	Buses	3.342	191
Camiones	834	80	Camiones	834	54
Moto	16.332	1.573	Moto	16.332	935
total	50.850	4.130	total	50.850	3.161
Total veh. Equivalentes	47.277	3.681	Total veh. Equivalentes	47.277	2.966

Flujo vehicular Bucaramanga - Girón			Flujo vehicular Bucaramanga - Girón		
Tipo	Tráfico todo el día	Hora pico (11:45 – 12:45)	Tipo	Tráfico todo el día	Hora pico (11:45 – 12:45)
Autos	5.946	402	Autos	5.946	402
Buses	1.143	93	Buses	1.143	93
Camiones	1.450	97	Camiones	1.450	97
Moto	4.032	267	Moto	4.032	267
total	12.571	859	total	12.571	859
Total veh. Equivalentes	13.873	964	Total veh. Equivalentes	13.873	964

Fuente: Inventario de tráfico 2009

Los datos anteriores se confirman con el estudio “Implantación SITM-UIS 2003” porque los habitantes deben desplazarse con mayor frecuencia desde la ciudad de Bucaramanga hacia los demás municipios que conforman el Área Metropolitana, teniendo como mayor porcentaje de desplazamiento el recorrido entre Bucaramanga y Floridablanca, a través de la Autopista Sur como vía de importancia.

Tabla 14. *Porcentaje de viajes intermunicipales*

Origen	Destino			
	Bucaramanga	Floridablanca	Girón	Piedecuesta
Bucaramanga	83,04%	60,72%	42,36%	38,85%
Floridablanca	9,73%	29,10%	13,75%	6,39%
Girón	2,73%	5,37%	41,24%	1,28%
Piedecuesta	4,51%	4,81%	2,66%	53,48%

Fuente: Estudio de Implantación SITM-UIS 2003

Ahora bien, en la figura 13 que corresponde a “conflicto de movilidad”, se muestra la alta congestión vehicular que presenta la Autopista Bucaramanga-Floridablanca, así mismo dentro del casco urbano de Bucaramanga se presentan conflictos de movilidad en los sitios: carrera 33, carrera 27 y sector de El Centro de la ciudad, debido a la gran afluencia de buses, colectivos, taxis y transporte particular. Sin embargo, esta es también una zona de conflicto debido al fenómeno social de invasión del espacio público. Tal situación influye en el incremento de la congestión en el sector.

Dentro de los sectores de menos incidencia por congestión vehicular, pero de alto impacto ambiental, se tienen: el anillo vial, la vía Bucaramanga-Girón, la calle 45 y algunos sectores del norte de la ciudad. Se exceptúa el sector de entrada y salida de la Autopista hacia la costa, donde el flujo vehicular es muy alto, principalmente por vehículos de carga y tracto camiones. En general los municipios de Piedecuesta y Girón también registran menores problemas de movilidad.

Fuente: Estudio de Implantación SITM-UIS 2003

Tabla 15. *Parque Automotor de la ZMB*

PARQUE AUTOMOTOR OFICIAL, PUBLICO PARTICULAR ÁREA METROPOLITANA DE BUCARAMANGA A DICIEMBRE 2017						
CLASE	PARQUE AUTOMOTOR GIRÓN	PARQUE AUTOMOTOR FLORIDABLANCA	PARQUE AUTOMOTOR BUCARAMANGA	PARQUE AUTOMOTOR PIEDECUESTA PROYECTADO	TOTAL PARQUE AUTOMOTOR ÁREA METROPOLITANA 2017	% VEHÍCULOS EN EL TOTAL
AUTOMÓVIL	25289	29536	94046	3038	151909	0,225278319
BUS	363	1139	1374	82	2958	0,4%
BUSETA	277	1012	679	194	2162	0,3%
CAMIÓN	4387	3870	7791	1282	17330	2,6%
CAMIONETA	11019	10841	34706	1574	58140	8,6%
CAMPERO	2267	3524	16705	616	23112	3,4%
MICROBÚS	429	1278	695	414	2816	0,4%
T CAMIÓN	555	2477	2216	240	5488	0,8%
VOLQUETA	863	699	1683	244	3489	0,5%
MOTOCICLETA	233311	106356	40855	17930	398452	59,1%
MAQ. AGRÍCOLA	48	0	53	0	101	0,0%
MAQ. INDUSTRIAL	17	0	48	6	71	0,0%
MAQ. CONSTRUCCIÓN	458	0	1072	0	1530	0,2%
MINIBÚS	0	5	0	0	5	0,0%
SEMI REMOLQUE	616	4816	153	0	5585	0,8%
REMOLQUE	5	15	69	0	89	0,0%
MOTOCARRO	576	285	52	0	913	0,1%
CUATRIMOTO	124	7	28	6	165	0,0%
MOTOCICLO	0	0	0	2	2	0,0%
TOTAL	280604	165860	202225	25628	674317	100%

Fuente: Dirección de tránsito y transporte de Bucaramanga

Teniendo en cuenta este inventario y la incidencia de estas fuentes, se hace necesario conocer el combustible de mayor uso. Los reportes indican que el 91% del parque automotor usa gasolina como combustible para su movilidad el 5.5% Diésel y el 3.7% GNV.

Ahora bien, conociendo el tipo de combustible que utiliza el parque automotor, es posible calcular el porcentaje de aportes de los distintos contaminantes derivados de la combustión como se muestra en la siguiente figura.

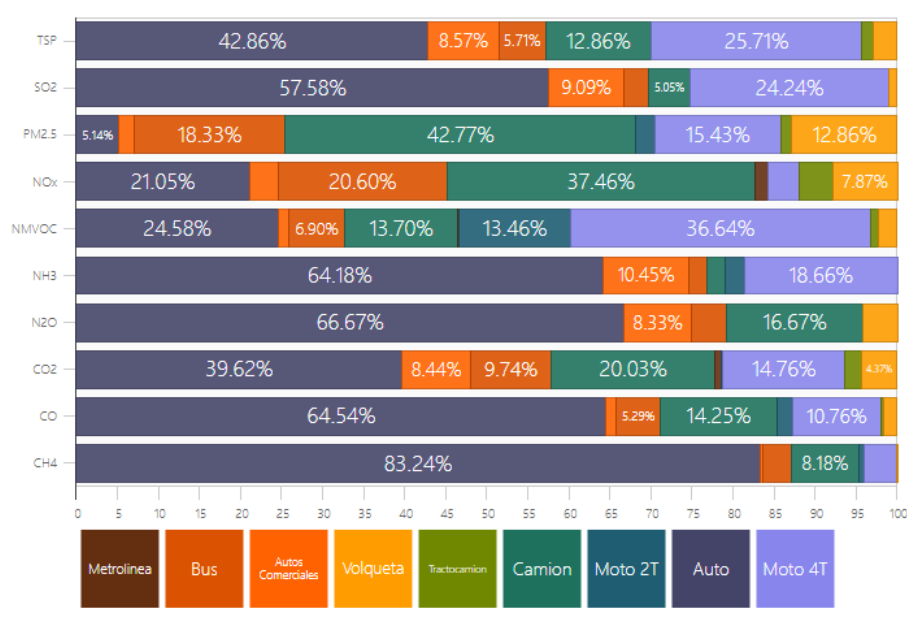


Figura 14. Emisiones Fuentes Móviles

Fuente: Observatorio del Área metropolitana de Bucaramanga

Como se observa en la figura 14, los mayores emisores de TSP, SO₂, NO_x, NMVOC, NH₃, N₂O, CO₂, CO y CH₄ son los automóviles que en su mayoría utilizan la gasolina como combustible.

5.3.2. Inventario de Emisiones. Tanto las fuentes tanto móviles como fijas, son los tipos de emisores más comunes y de mayor impacto dentro de la jurisdicción de la ZMB, siendo las móviles aquellas que ejercen mayor influencia en la contaminación del aire, como puede observarse a continuación.

5.3.2.1. Fuentes móviles. Conociendo el tipo de vehículo y el combustible utilizado se puede especificar la carga contaminante que éstas fuentes tienen sobre el ambiente en la Tabla 16 se puede observar que los vehículos particulares son los aportantes principales de CO y SO_x. Por

otro lado, aproximadamente el 20% de las emisiones de NO_x, VOCs y algo de PM_{2.5} secundario, también son aportadas por el parque automotor particular. Vehículos como los camiones y volquetas, que son considerados como vehículos de trabajo pesado, también hacen un aporte a las emisiones de PM_{2.5} y NO_x pero en menor proporción.

Tabla 16. *Emisiones de contaminantes criterio por categoría vehicular 2016*

Categoría vehicular	ton/año				
	CO	NO_x	SO_x	VOC	PM_{2.5}
Autos particulares	21.355	834	58	495	17
Autos comerciales	422	139	9	26	7
Buses	1.738	809	3	138	26
Camiones	4.715	1.485	6	276	134
Motos 2T	592	1	0	271	7
Motos 4T	3.560	152	25	739	49
Tracto camiones	98	162	1	20	5
Volquetas	577	313	1	47	41
Total	33.057	3.895	103	2.012	286

Fuente: AMB – Inventario de Emisiones Atmosféricas.

Las emisiones de gases de efecto invernadero y su participación en la contaminación de la atmosfera de la zona de estudio, son los vehículos particulares uno de los principales responsables de las emisiones de CH₄ y N₂O; este último en aproximadamente un 69%. Los camiones aportan aproximadamente el 14%. En lo que respecta al CO₂, los vehículos particulares, camiones y motos 4T son los principales aportantes. Esta información se condensa en la tabla 17 especificada por categoría vehicular.

Tabla 17. *Emisiones de gases de efecto invernadero por categoría vehicular 2016*

Categoría vehicular	ton/año		
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Autos particulares	348.256	4.763	17
Autos comerciales	74.177	25	3
Buses	84.713	195	2
Metrolínea	6.554	0	0,04
Camiones	176.050	469	4
Motos 2T	1.865	42	0
Motos 4T	129.781	227	0
Tracto camiones	18.305	0	0,5
Volquetas	38.450	4	2
Total	878.150	5.725	28
Total CO2-eq	1.006.961		

Fuente: AMB – Inventario de Emisiones Atmosféricas

5.3.2.2. Fuentes Fijas. El registro de emisiones de fuentes fijas para el Área Metropolitana correspondiente al año base del 2016, relaciona 72 empresas y 85 fuentes de emisión. En la tabla 18 se muestran las emisiones de contaminantes por sector.

Tabla 18. *Emisiones por sector en ton/año 2016*

Sector	VOC	SO _x	PM _{2.5}	PM ₁₀	NO _x	MP	CO
ASF	0.03	0.00	0.00	0.00	0.60	0.01	0.47
BAT	120.62	119.22	0.17	38.65	2016.43	70.13	1711.86
MMC	0.01	0.00	0.00	0.00	0.25	0.00	0.17
OTR	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.02
PCE	0.00	0.13	0.02	0.05	0.08	0.08	0.05
TER	0.04	0.00	0.00	0.09	0.76	0.00	0.51
TXT	0.01	0.00	0.00	0.00	0.24	0.00	0.19
Total	120.71	119.35	0.19	38.70	2018.41	70.22	1713.27

Fuente: <http://emisionesatmosfericas.amb.gov.co/inventarioff/EmisionesSector>

Como se observa en la Tabla 18, los mayores aportantes de contaminantes hacia la atmósfera son las empresas del sector bebidas, alimentos y tabaco (BAT).

En la Tabla 19 se muestra un consolidado de todos los aportes a las emisiones contaminantes al aire procedentes de fuentes fijas y móviles. Dentro de las consideraciones para el diseño del SVCA es necesario establecer las conexiones entre las fuentes y el impacto que estas generan sobre el ambiente. El resultado del inventario de emisiones arroja que las fuentes con mayor influencia sobre la calidad del aire de la ZMB son las fuentes móviles, siendo el PM_{2.5} el contaminante de mayor impacto, lo que podría ocasionar efectos nocivos en la comunidad.

Tabla 19. *Inventario Total de Emisiones ZMB, 2016*

Contaminante	Fuentes Fijas		Fuentes Móviles		Total Emisiones ton/año
	Emisiones	% de	Emisiones	% de	
	[ton/año]	Aporte	[ton/año]	Aporte	
VOC	120,7	5,6	2.017	94,4	2.137,70
SO _x	119,4	53,7	103	46,3	222,4
NO _x	2.018,40	33,8	3.958	66,2	5.976,40
PM _{2.5}	0,2	0,1	317	99,9	317,2
PM ₁₀	38,7	100		0	38,7
MP	70,2	100		0	70,2
CO	1.713,30	4,9	33.051	95,1	34.764,30
CO ₂	2.336.827,00	72,7	878.150	27,3	3.214.977,00

Fuente: AMB – Inventario de Emisiones Atmosféricas

5.4. Aspectos de Salud Pública

En Colombia, el material particulado es el contaminante del aire de mayor preocupación, dadas las altas concentraciones que eventualmente se reportan en las ciudades. De acuerdo con el informe del estado de la calidad de aire en Colombia 2007-2010, la concentración promedio anual de PM₁₀ en 2010 varió en un rango entre 25 y 60 µg/m³. Estudios realizados en diferentes ciudades

del país, han mostrado asociación entre el incremento de los niveles de PM_{10} y su efecto en el sistema respiratorio humano (Rodríguez et al. 2012, Quiroz et al. 2013), al igual que a nivel cardiovascular (Ramírez et al, 2012) y su impacto en las tasas de mortalidad (Romero et al. 2013, Blanco et al. 2014). Cabe anotar que actualmente las concentraciones de material particulado en el aire para algunas ciudades, se encuentra por debajo de los límites permitidos por la norma colombiana, pero en el límite de los niveles máximos permisibles de OMS.

Durante las últimas décadas, la contaminación del aire en el ambiente exterior ha sido asociada con el aumento en las tasas de incidencia, exacerbación y morbi- mortalidad por la ocurrencia de enfermedades cardiovasculares y respiratorias como el asma y la enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC). De igual manera, la contaminación del aire se ha relacionado también con el cáncer de pulmón, los infartos agudos de miocardio, la insuficiencia cardíaca y ciertos tipos de accidente cerebrovascular. El material particulado fino ($PM_{2.5}$) es el contaminante del aire cuya estadística registra mayor consistencia con los efectos adversos sobre la salud, lo cual se explica en gran parte por su capacidad de penetrar las vías aéreas inferiores (alveolos pulmonares) y ocasionar respuesta inflamatoria y oxidativa local o sistémica del organismo. Adicionalmente, la contaminación por material particulado ha sido identificada por la Agencia Internacional de Investigación en Cáncer (IARC, por sus siglas en inglés) como un agente cancerígeno para los humanos. (OSPS,2016).

En el estudio realizado por el OSPS publicado en abril de 2010, ‘Contaminación atmosférica y sus efectos en la salud en Bucaramanga’, se tomaron los registros de 2006 a 2008 y de 2008 a 2010 y los datos de calidad de aire. estas bases de datos se cruzaron con los estudios de salud de la población pediátrica y adulta. Los resultados mostraron que los niños y los adultos que vivían en sectores de mayor concentración de material particulado y padecían de alguna enfermedad

respiratoria o cardiovascular, tenían mayor tendencia a presentar aumento en la gravedad de sus síntomas. También se incrementó la frecuencia de síntomas relacionados con el asma en niños (Rodríguez et al. 2010).

5.5. Síntesis de las condiciones físico-ambientales y de salud de la ZMB.

Conociendo los aspectos que describen la Zona Metropolitana de Bucaramanga como zona de interés, seguidamente se establecen las condiciones Físico-Ambientales y de salud más relevantes.

La contaminación atmosférica y el impacto que ésta ocasiona, es considerada como un “sistema” conformado por tres elementos: Emisor, Receptor y Medio de transporte. (Finlayson-Pitts B, & Pitts J. Jr, 1999). El emisor, que en el caso de la ZMB son las fuentes móviles, presentando un aporte de contaminantes significativamente mayor a las fuentes fijas (ver tabla 19). El aporte de las Fuentes móviles en relación con el $PM_{2.5}$ es del 99.9%, para el CO y NO_x son del 95.1% y 66.2% anual respectivamente. En cuanto a los contaminantes tóxicos, se tiene un porcentaje de participación en la carga ambiental total anual de VOC's de 94.4%. Estos valores muestran la alta influencia de estas fuentes en la calidad del aire y la necesidad de generar estrategias de monitoreo sobre las mismas.

El segundo elemento es el receptor, el cual hace referencia al área superficial de la zona geográfica seleccionada por el estudio, conformada por los municipios de Bucaramanga, Floridablanca, Girón y Piedecuesta, incluyendo todo objeto o material construido que se encuentre en ellas, tal como su población.

Un elemento final es el medio de transporte, conformado por la capa troposférica y su dinámica, influenciada por los vientos. En este elemento influyen también las características

meteorológicas de la zona. Teniendo en cuenta que las lluvias y los vientos son agentes que permiten limpiar la atmósfera, el seguimiento a estos fenómenos naturales es de vital importancia en el diseño de un SVCA. Para la ZMB se tiene una precipitación de tipo bimodal con 2 periodos secos y 2 lluviosos y un promedio anual de precipitación de 1.253 mm. En periodos de periodos de sequía se debe prestar mayor atención al comportamiento de la calidad del aire, puesto que se pueden presentar alertas por episodios de alta contaminación. En cuanto a los vientos, típicamente su intensidad es débil (Vientos en Calma) con un valor anual medio de 1.8 m/seg y dirección Norte o Nor-Oriente. Los vientos en calma pueden estancar los contaminantes impidiendo que los contaminantes se dispersen, lo cual obliga a hacer más rigurosas las estrategias para controlar las emisiones.

5.6. Definición de la línea base ambiental para la ZMB.

A partir del análisis de las condiciones físicas y ambientales realizado en la ZMB, es posible generar una línea base que permitirá establecer ciertas consideraciones técnicas requeridas en el diseño del sistema de vigilancia de la calidad del aire, como se presenta a continuación:

5.6.1. Suelos. La Zona Metropolitana de Bucaramanga se localiza en el costado occidental de la Cordillera Oriental, con una amplia influencia del Valle del Magdalena Medio. Se encuentra entre los 777 m.s.n.m. y los 1.005 m.s.n.m., cuyas alturas promedio varían según los municipios que la conforman. Dentro del área en estudio, se pueden encontrar dos sectores definidos. El primero corresponde al sector oriental de la Cuenca Superior del Río Lebrija, que se caracteriza por presentar un relieve montañoso y pronunciado. El segundo corresponde al sector occidental,

el cual presenta un relieve más suave, con formaciones de plataformas denominadas “mesas”. (AMB - UIS, s.f.). En este sector se encuentra ubicada nuestra zona de interés ambiental.

5.6.2. Meteorología. En cuanto a las precipitaciones, se presenta un régimen bimodal de lluvias, caracterizado por la presencia de dos periodos lluviosos al año y dos periodos secos. En cuanto a las precipitaciones medias anuales, se presentan valores que oscilan entre los 500 y 2,500 mm.

La temperatura de la zona, típica de climas tropicales, varía de cálida a templada o fría, dependiendo de la altitud en donde se encuentre la zona. En cuanto a la dinámica de los vientos, cuya influencia en el transporte y dispersión de los contaminantes es importante, se observa que en la ZMB prevalecen vientos de intensidad débil o vientos en calma, con un valor anual medio de 1.8 m/seg Norte y Nor-Este.

La consistencia en el comportamiento de estos parámetros a través del tiempo, ya sea del transporte de las plumas de dispersión de los contaminantes emitidos por las fuentes móviles u otras actividades urbanas a través de la capa atmosférica superficial, al igual que la dirección y velocidad prevalente de los vientos y algunos factores de campo adicionales, han sido elementos fundamentales para justificar la localización de los nuevos sitios de monitoreo. (Gallegos, B., et al, 2017 y Lazar, R. & Eder, J., 2001).

5.6.3. Vías, tráfico y sectores más impactados. Según los registros de la Dirección de Tránsito y Transporte de Bucaramanga, se evidencia un aumento sostenido de las fuentes móviles a partir del año 2010 hasta el 2019, equivalentes al 96.5%. Este incremento de fuentes móviles,

sumado a la poca disponibilidad de las vías, genera sectores críticos para la movilización vehicular con alta congestión y, por ende, un aumento de contaminantes en el aire. Las siguientes vías presentan conflictos de movilidad: la Autopista Bucaramanga-Floridablanca, la carrera 33 del casco urbano de Bucaramanga al igual que la carrera 27 y sector de El Centro de la ciudad, debido a la gran afluencia de buses, colectivos, taxis y transporte particular. Tales zonas se encuentran descritas en la imagen “conflicto de movilidad” (figura 13).

El anillo vial, la vía Bucaramanga-Girón, la calle 45 y algunos sectores del norte de la ciudad, aunque no presentan alta congestión como los nombrados anteriormente, debido a la cantidad de vehículos que transitan la zona su impacto ambiental es bastante alto. Los sectores que se encuentran cercanos a las vías mencionadas son puntos focales de interés para vigilar, controlar y hacer seguimiento de la calidad de aire.

5.6.4. Contaminantes presentes en la ZMB. De los monitoreos de calidad de aire realizados históricamente en la ZMB, se observan como resultado, los siguientes contaminantes de interés:

Con referencia a las mediciones realizadas en el período comprendido entre el 2007 al 2015, existen reportes del estado de la calidad de aire para la ZMB, donde se pueden evidenciar altas concentraciones de PM_{10} en la Zona Centro, superando incluso, los límites de norma en los años 2007 y 2009. También se observa que el comportamiento del Ozono durante el periodo de tiempo del 2011 al año 2015, se mantuvo al límite de la norma para este oxidante atmosférico y en algunos casos superada. (Ver figura 15).

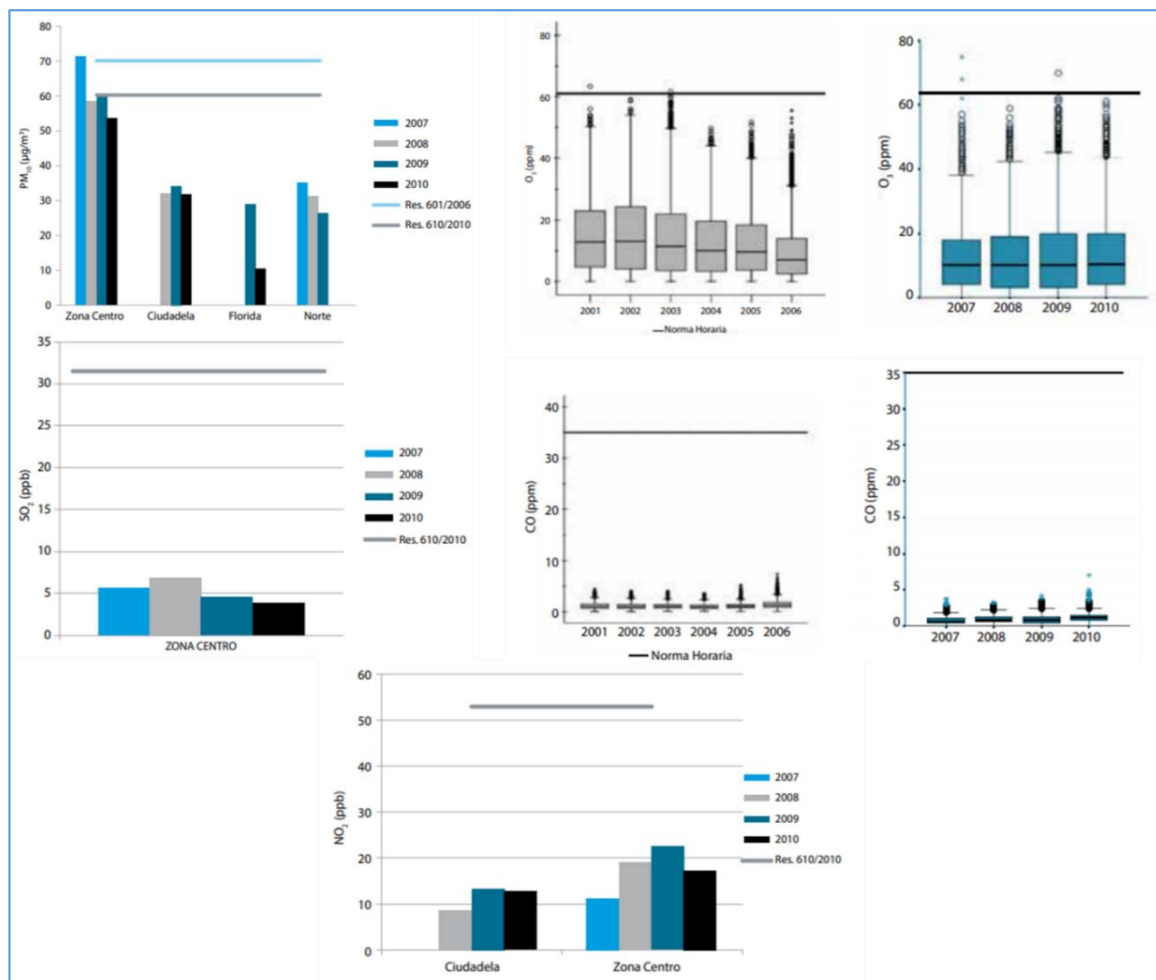


Figura 15. Concentraciones promedio anuales para las estaciones de la CDMB 2007 - 2010
Fuente: IDEAM – Informe del Estado de la Calidad del Aire en Colombia 2007 – 2010

Durante el 2014, en la ZMB se reportaron valores de calidad de aire “Peligroso” durante 6 meses. Los contaminantes que superaron el límite permisible fueron el PM y el Ozono, los cuales deben ser vigilados de forma cuidadosa en el SVCA que se implemente debido al comportamiento sostenido que tuvieron durante el período (ver figura 16).

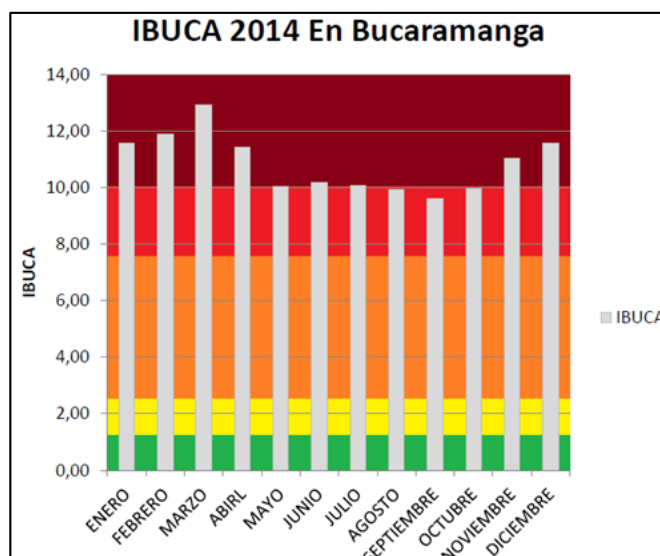


Figura 16. IBUCA para ZMB 2014

Fuente: CDMB

Datos más recientes tomados por el AMB, autoridad que regula actualmente los programas de calidad del aire, ratifica que los contaminantes que más se mantienen al límite máximo de la norma establecida en Colombia son el $PM_{2.5}$ y el PM_{10} (ver figura 17) por lo que el ICA reportado a la comunidad es calculado y monitoreado constantemente con base en alguno de estos dos valores. Actualmente se toman los valores medidos del primer contaminante.

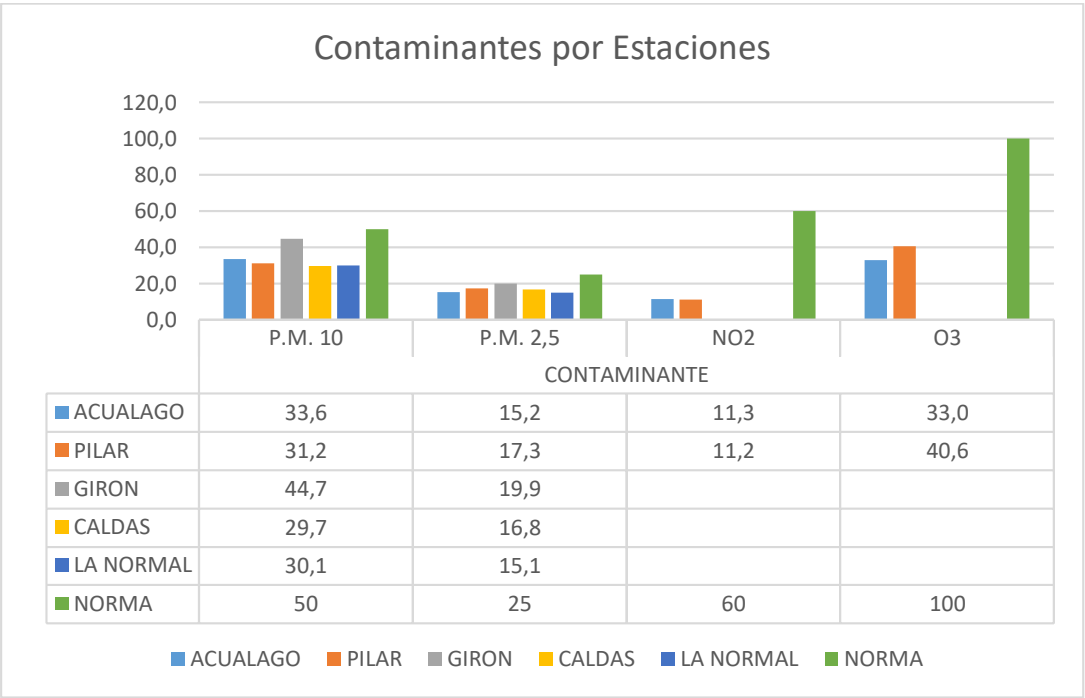


Figura 17 Reporte mediciones por Contaminante SVCA – AMB

Fuente: Datos suministrados por el AMB – Subdirección Ambiental. Compilación: Autor

En los reportes del ICA para la ZMB mostrados en la figura 18 se puede observar la tendencia a manejar un nivel aceptable de calidad del aire en la mayoría de los puntos monitoreados. Las estaciones que mostraron una condición desfavorable fueron la estación de El Pilar, la estación Girón y la de Escuela Normal; esta última ubicada en una zona de conflictos de movilidad.

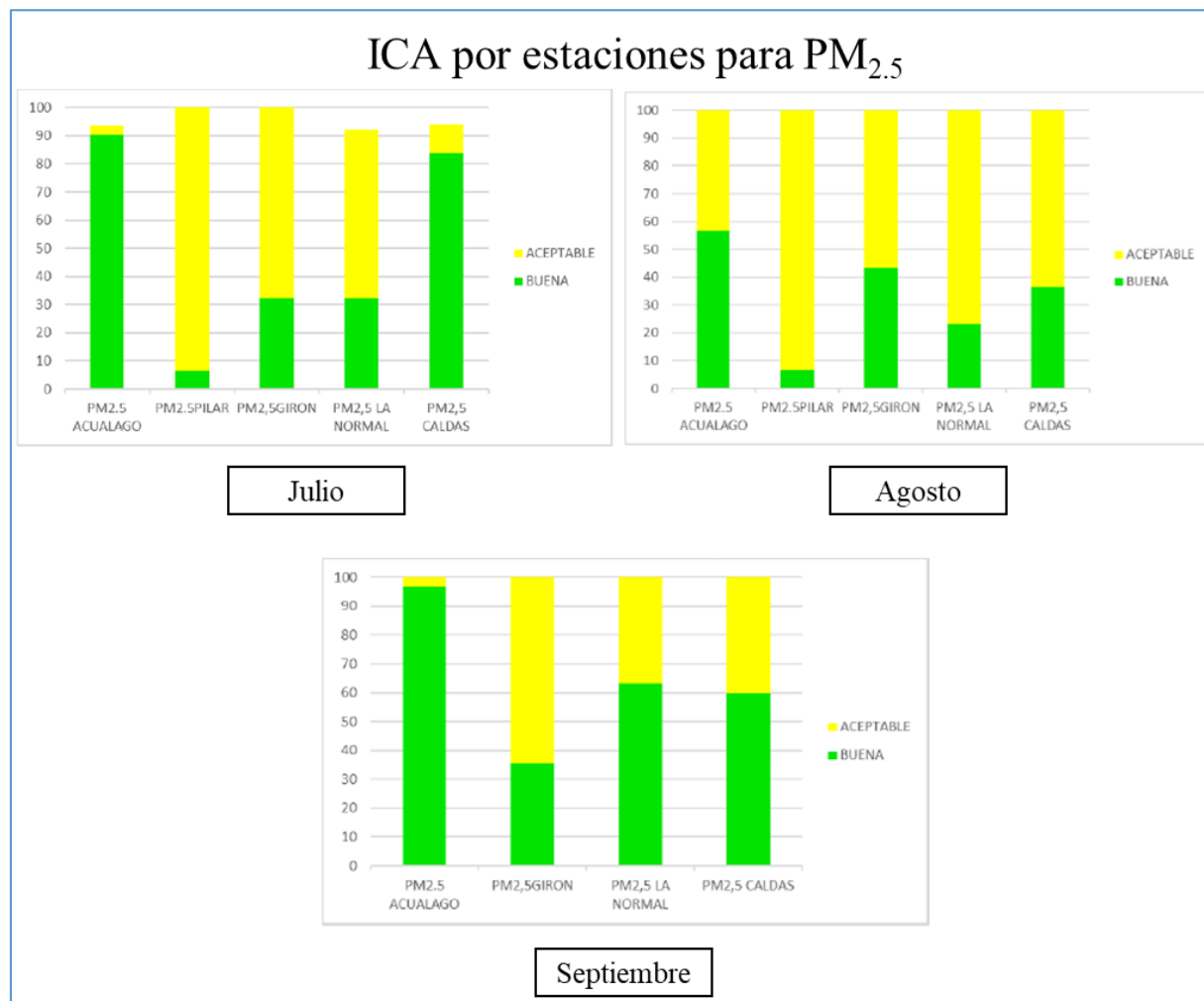


Figura 18. ICA SVCA - AMB (Julio – Septiembre 2019)

Fuente: AMB – Autoridad Ambiental – Recurso Aire – Calidad de Aire – Informes Calidad de Aire (<https://www.amb.gov.co/calidad-del-aire/>)

La información recopilada de los distintos reportes de calidad de aire para la ZMB permite ratificar la importancia de realizar actividades de monitoreo y control de la calidad del aire, especialmente para el material particulado y el ozono troposférico.

5.6.5. Población y afecciones a la salud. La ZMB cuenta con 1.160.243 habitantes, con una relación mujeres a hombres del 1.06. Las edades predominantes se encuentran en la franja de

los 25 – 29 años de edad. Un 94.5% de la población vive en zona urbana y aproximadamente la mitad de este porcentaje habita en Bucaramanga (17.204 hab/km² aprox).

En cuanto a las afecciones en la salud, se evidencia una relación entre el agravamiento de los síntomas de enfermedades respiratorias y también cardiovasculares, en su mayoría niños y adultos mayores vulnerables, debido a otras enfermedades que padecen. Los niños sanos presentaran síntomas relacionados con el asma cuando se encuentran en zonas de alta concentración de contaminantes.

5.6.6. Red actual de monitoreo y vigilancia de calidad de aire para la ZMB. A continuación, se describe brevemente el SVCA que se encuentra bajo la dirección del AMB.

De acuerdo con lo estipulado en la norma colombiana, el sistema de vigilancia de calidad del aire para la ZMB, se clasifica como un SVCA de Tipo III, por lo que deben medir como mínimo, los siguientes parámetros: PM₁₀, PM_{2.5} y Ozono (O₃) además de los parámetros meteorológicos básicos.

En la imagen 19, se muestra el dominio y la distribución geográfica de las 5 estaciones fijas con las que cuenta el sistema automático de vigilancia de la calidad del aire del AMB, EOLO. Tales estaciones son modulares y cuenta, además, con equipos de alta tecnología.

- Estación No. 1: Escuela Normal Superior Sede C (Cra. 27 # 29 – 69)
- Estación No. 2: Colegio Nuestra Señora del Pilar (Ciudadela Calle de los estudiantes 9 – 323)
- Estación No. 3: Instituto Caldas Transversal Oriental Lagos Del Cacique
- Estación No. 4: Parque Acualago Calle 29 # 10-13
- Estación No. 5: Secretaría del Adulto Mayor Girón – Diagonal 15 Carrera 17



Figura 19 Ubicación estaciones SVCA – AMB

Fuente: AMB

6. Consideraciones Técnicas en el diseño del SVCA para la ZMB

Con base en las normas y lineamientos sobre sistemas de monitoreo y vigilancia de la calidad del aire, fundamentado en la literatura técnica disponible y las guías y protocolos emitidos por el MADS, INE y USEPA sobre el particular, en el presente capítulo se presentan las consideraciones técnicas aplicables al diseño de un SVCA para la ZMB. Si bien el alcance de la propuesta no incorpora estudios de presupuesto, las consideraciones aquí indicadas pueden aplicarse durante la etapa de Ingeniería Básica de los proyectos de inversión.

Entendida la necesidad de establecer un programa de Gestión de la Calidad del Aire, la Entidad Ambiental respectiva, procederá a construir un modelo de SVCA adecuado a sus necesidades, con base en las consideraciones técnicas aquí señaladas. Tal estructura deberá ajustarse para responder, entre otras, a las siguientes preguntas: ¿Cuál es el área geográfica de la ZMB en donde se pretende monitorear la calidad del aire y por qué? ¿Qué cobertura territorial

deberá alcanzar el SVCA? ¿Qué tipo de contaminantes deben ser monitoreados prioritariamente?
¿Qué equipos de monitoreo serán los más adecuados?

6.1. Descripción del modelo estructural para el SVCA

6.1.1. Dominio del SVCA. Como la jurisdicción de interés involucra los municipios de la ZMB y el alcance del Programa de monitoreo contempla determinar la calidad del aire para dicha zona, se define como dominio del SVCA el ámbito territorial comprendido por el casco urbano y la zona industrial de Bucaramanga, los cascos urbanos de Floridablanca, Girón, la Zona Industrial de Chimitá y el municipio de Piedecuesta para un total de 1.160.243 habitantes.

6.1.2. Escala de representatividad del contaminante y tipo de sitio. La escala de representatividad depende de la topografía del territorio, de su entorno natural o urbano, de la ubicación y características de las fuentes, la clase de contaminante emitido y la meteorología local, entre otros factores. (INE, Manual 3).

Las estaciones para medir la calidad del aire, al ser ubicadas en determinado sitio dentro del dominio de la red, necesitan un espacio territorial cuyas dimensiones físicas correspondan a la parcela de aire más cercana al lugar en el cual los registros de las concentraciones del contaminante sean similares. De otro lado, tipificados individualmente los sitios de monitoreo para las cuatro jurisdicciones municipales, por sus características geográficas, de clima, de población, de uso del suelo y actividades en general, se observa que son relativamente homogéneas; En consecuencia, tales criterios de homogeneidad permiten elegir la escala de *vecindario*, como área territorial de

representatividad espacial para el SVCA. En consecuencia, el monitoreo de los contaminantes estaría dirigido tanto a la población como a preservar su bienestar.

6.1.3. Objetivos del SVCA. Para caracterizar el modelo de SVCA propuesto es necesario establecer los objetivos, para lo cual se han definido los siguientes:

- Cumplir con la norma nacional y los estándares de calidad de aire.
- Definir protocolos de control en caso de episodios de contaminación del aire.
- Validar modelos de dispersión de calidad del aire
- Establecer programas de Gestión y control de los contaminantes emitidos por las fuentes móviles.

Tales objetivos se han justificado por la variabilidad del clima de nuestra región, la poca presencia de vientos durante los períodos de sequía y por el incremento anual de las fuentes móviles. Además, es necesario que todo SVCA deba tener instalado y en operación un software o modelo de dispersión de los contaminantes, toda vez que le permita comparar los datos de campo con lo modelado, evaluar la diferencia o *gap* entre las lecturas y hacer los ajustes de relocalización de las estaciones u otra causa, en caso necesario.

Un factor adicional que permitió definir los objetivos propuestos, se basó en la alta influencia que tienen las fuentes móviles y su impacto sobre la calidad de aire. Es necesario diseñar un programa de gestión que permita cruzar los resultados de los reportes de revisión técnico-mecánico en automóviles, hasta su movilidad en vías.

6.2. Criterios a considerar para el SVCA de la ZMB

6.2.1. Contaminantes a monitorear. Para identificar los contaminantes a monitorear y definir su concentración, es necesario tener en cuenta tres aspectos importantes:

- Normatividad relacionada con la calidad del aire.

Tanto las normas de calidad del aire aplicables al ambiente urbano, como los registros históricos, si se tienen, son fundamentales para definir, tanto los contaminantes criterio, como otras especies que debido a su toxicidad podrían afectar la salud de la comunidad y el ambiente.

- Registros históricos de calidad del aire y empleo del software de dispersión.

Tanto los registros históricos de campo como el empleo de software de dispersión, son herramientas de apoyo para estimar las concentraciones de los contaminantes presentes en la zona. Sin embargo, cuando no se conoce la zona ni se dispone de registros de campo, o si se desea, para realizar un monitoreo indicativo por primera vez, es clave el uso de la herramienta de software de *dispersión*.

Para definir los contaminantes criterio o los de alto riesgo para la salud, regulados o no, es conveniente también caracterizar el material emitido por las fuentes del área, los registros de los receptores y comparar sus valores con la normatividad (Resolución 2254 de 2017). Nuestro caso particular privilegia considerar los registros de campo históricos, obtenidos a través de los programas de monitoreo y vigilancia de la calidad del aire realizados por CDMB y AMB.

Adicionalmente y dependiendo del resultado del diagnóstico preliminar, se sugiere incluir los contaminantes causantes de olores ofensivos, descritos en la Resolución 1541 del 2013 ejemplo: Sulfuro de Hidrógeno (H_2S), Azufre total reducido (TRS) y Amoniacó (NH_3), acorde con lineamientos del protocolo descrito en la Resolución 2087 del 2014.

De acuerdo a lo anteriormente expuesto los contaminantes objetivo para monitorear en la propuesta del SVCA para la ZMB son:

Tabla 20. *Contaminantes a monitorear SVCA - ZMB*

Tipo de contaminante	Contaminante
<i>Contaminante Criterio</i>	PM ₁₀ *
<i>Contaminante Criterio</i>	PM _{2,5} *
<i>Contaminante Criterio</i>	NO _x
<i>Contaminante Criterio</i>	Ozono (O ₃)
<i>Contaminante Criterio</i>	SO ₂
<i>Contaminante Tóxico</i>	VOCs*
<i>Olores Ofensivos</i>	H ₂ S
<i>Olores Ofensivos</i>	Compuestos Sulfurados

*Realizar especiación química

Fuente: Autor.

6.2.2. Especiación química de un contaminante atmosférico. Definidos los contaminantes a monitorear y establecido el programa de monitoreo de calidad del aire, conviene evaluar acciones futuras de especiación química, en especial para el material particulado. El propósito de la especiación química es identificar y caracterizar otras formas o estructuras moleculares presentes en la muestra de un determinado contaminante (Hlavay et al, 2004). Es importante considerar la presencia de hollín como Black Carbon, hidrocarburos poli aromáticos PAH's y minerales como hierro, cromo, cobre, etc todos ellos de efectos significativos en la salud.

6.2.3. Número de estaciones propuestas. El número de estaciones correspondientes a un SVCA depende de diversos factores. No siempre se obtiene el número requerido de estaciones al inicio de la puesta en funcionamiento de los sistemas de vigilancia. Para lograr una primera aproximación, es necesario conocer la población comprendida dentro del dominio del sistema y,

posteriormente, aplicar los instructivos sobre el particular, dados en el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire. Otro factor a considerar es definir la extensión geográfica de la zona de monitoreo.

El progresivo crecimiento de las ciudades exige que los SVCA sean evaluados periódicamente – cada dos o tres años – y actualizados, tanto en el tipo de contaminantes a vigilar, como en el número de estaciones y su localización, para garantizar que la cobertura del sistema sea representativa para los objetivos propuestos.

Con base en el número de habitantes de la zona y lo establecido en el protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire MADS, el SVCA propuesto debe configurarse como un sistema TIPO III: INTERMEDIO y contar con las características mínimas expuestas en la tabla 21.

Tabla 21. *Descripción SVCA Tipo III*

Característica	Parámetro	Observaciones
Tecnología de Medición	Pasivo Activo Automático	
Tiempo de monitoreo	Permanente	
Periodicidad del monitoreo	Permanente	
Parámetros a medir	PM ₁₀ PM _{2.5} Ozono	Serán definidos otros contaminantes de acuerdo con el inventario de emisiones, campañas de monitoreo, información existente o el modelo de dispersión
Número de estaciones	Mínimo 3 estaciones de PM ₁₀ Mínimo 1 estación de PM _{2.5} Mínimo 1 estación de O ₃	
Tipo de estaciones	Fondo Fondo urbano indicativas EPE	
Ubicación estaciones	De acuerdo con el diseño específico descrito en el diseño detallado	

Tabla 21. (Continuación)

Característica	Parámetro	Observaciones
Periodicidad del muestreo	Muestreadores activos cada tercer día. Para muestreadores pasivos: tres series de un mes de duración cada dos años. Para analizadores automáticos: permanente.	
Instrumentos meteorológicos	Pluviómetros automáticos Estaciones meteorológicas automáticas portátiles Estación meteorológica de alta precisión Parámetros a monitorear: (WV, WS, RH, T, P, SR)	

Fuente: MADS - Manual de diseño de sistemas de vigilancia de la calidad del aire

Teniendo presente las especificaciones mínimas que debe cumplir el SVCA para la ZMB, en la tabla 22 se especifica el número de estaciones propuesto y su distribución geográfica en la zona de estudio junto con otras características necesarias área el diseño del SVCA.

Tabla 22. Distribución Geográfica estaciones SVCA propuesto

Sector	Escala	Estación	Ubicación	Tipo de área	Tipo de estación	Fija o móvil	Contaminantes
Floridablanca	Vecindario	E1	Universidad Santo Tomás	Urbana	Tráfico	Fija	Meteorología PM ₁₀ , PM _{2.5} , NO ₂ , O ₃ , VOCs
Zona Oriente de Bucaramanga	Vecindario	E2	UNAB	Urbana	Tráfico	Fija	Meteorología PM ₁₀ , PM _{2.5} , NO ₂ , O ₃
Zona Occidente de Bucaramanga	Vecindario	E3	Colegio Nuestra Señora del Pilar – Calle de los estudiantes 9 - 323	Urbana	Tráfico	Fija	Meteorología* PM ₁₀ , PM _{2.5} , NO ₂ , O ₃ , VOCs
Girón	Vecindario	E4	Secretaría del Adulto Mayor	Urbana	Tráfico Industrial	Fija	Meteorología* PM ₁₀ , PM _{2.5} , NO ₂ , O ₃ Compuestos sulfurados RSH H ₂ S

Tabla 22. (Continuación)

Sector	Escala	Estación	Ubicación	Tipo de área	Tipo de estación	Fija o móvil	Contaminantes
Zona Occidente de Bucaramanga	Vecindario	E5	Parque San Francisco	Urbana	Tráfico	Fija	Meteorología PM ₁₀ , PM _{2.5} , NO ₂ , O ₃ VOCs
Norte de Bucaramanga	Vecindario	E6	Barrio Los Colorados	Rural	Fondo	Fija	Meteorología PM ₁₀ , PM _{2.5}
ZMB (compartida)	Vecindario	EM1	Zona Industrial Chimitá Piedecuesta – ICP (Punto entre el ICP y la población de Piedecuesta) CAI Policía de la Virgen	Urbana	Urbana - Industrial	Móvil - Indicativa	Meteorología PM ₁₀ , PM _{2.5} , NO ₂ , O ₃ Compuestos Sulfurados VOCs

*Opcional

Fuente: Autor

Con el objetivo de extender la cobertura del sistema y que la escala de representatividad espacial sea lo suficientemente amplia, para los nuevos sitios se tuvieron en cuenta factores como conflictos de movilidad, zonas con alto índice poblacional y variables meteorológicas, a fin de elaborar una redistribución de las estaciones adecuadamente e incorporando las que actualmente posee el SVCA de AMB.

Para la reubicación de las estaciones 1, 3 y 4 (Numeral 5.6 sección f) se tuvo en cuenta la dirección prevalente de los vientos y la estructura geográfica de la zona, de forma que se permita un muestreo de los contaminantes lo más acoplado a la dinámica general del aire en la ZMB.

La estación 1 ubicada anteriormente en la Escuela Normal Superior- sede C, se podría relocalizar hacia el Parque de San Francisco, la estación 3 del Instituto Caldas Transv- Oriental Lagos Del Cacique, pasaría a la UNAB y la estación 4, Parque Acualago Calle 29 # 10-13, se reubicaría hacia la Universidad Santo Tomás sede Floridablanca.

Teniendo en cuenta que la zona norte de la ZMB no se encuentra cubierta por el actual SVCA, se propone agregar una estación de fondo rural en el norte de la ciudad, para evaluar el material particulado (Contaminante de mayor afectación en la zona de estudio) e incluir una estación hidrometeorológica.

De igual forma se propone agregar una estación móvil equipada con equipos de Meteorología, muestreadores para PM₁₀, PM_{2.5}, analizadores de NO₂, O₃, Compuestos Sulfurados y VOCs para la Zona Industrial Chimitá, Piedecuesta – ICP (Punto entre el ICP y la población de Piedecuesta) y el CAI Policía de la Virgen (Norte) con el objeto de cubrir el alcance del SVCA. El monitoreo de los compuestos sulfurados en esta estación y en la estación 4 (Girón) se incluye con el objetivo de medir las concentraciones de los contaminantes producto de los olores ofensivos generados por fuentes de interés sanitario y ambiental (El Carrasco, La PTAR, la Zona industrial de Chimitá y el ICP).

Para las estaciones que realizan mediciones de VOC's se propone realizar una especiación química para evaluar la concentración de benceno en estos gases, ya que éste compuesto es de gran afectación a la salud de los habitantes. Además, se propone la especiación química del Material Particulado, como se mencionó antes, el cual se encuentra presente en el aire producto de la combustión y que provoca importantes efectos negativos sobre la salud, ya que tales partículas son inhaladas por el ser humano y pueden afectar directa o indirectamente al sistema pulmonar y los bronquiolos e incrementar el riesgo de padecer infecciones respiratorias como EPOC, afecciones del sistema circulatorio en especial las coronarias y algunos tipos de cánceres.

6.2.4. Tecnologías sugeridas para los equipos de monitoreo del SVCA. En cuanto a la tecnología a implementar, se propone seguir trabajando con la actual y reforzarla con los equipos

necesarios para realizar las mediciones propuestas. Es importante tener en cuenta que los equipos ya son conocidos por el AMB, los módulos son compactos, resistentes a la intemperie, se tiene respaldo de repuestos, accesorios y el mantenimiento oportuno; además; su factor de servicio es bueno (Equipos Automáticos Modernos).

De otro lado, no sería conveniente transformar el sistema actual, instalando otras tecnologías para los equipos sugeridos, ya que sistemas híbridos pueden presentar conflictos en la sincronización de la información. Además, se tendría mayor comodidad de mantenimiento y ahorros en los costos de stock si se continua con la misma tecnología. A continuación, se relacionan las tecnologías sugeridas:

- Equipos de monitoreo ambiental

Tabla 23. Especificaciones equipos de Monitoreo Contaminantes Atmosféricos

Marca	Equipo	Descripción	Contaminante a Monitorear
Teledyne	Model T640 	Modelo T640 de la API de Teledyne con la opción 640X es un monitor de masa de Material particulado (PM) en tiempo real que utiliza espectrometría de luz dispersa para la medición.	PM ₁₀ y PM _{2.5} Mide 2.5 PM, y la opción 640X mide 2.5, 10 y PM grueso.
Teledyne	Model T200 	El analizador modelo T200 NO / NO ₂ / NO _x utiliza el principio de detección de quimioluminiscencia comprobado, junto con la electrónica de vanguardia para permitir mediciones precisas y confiables de bajo nivel para su uso como analizador ambiental o monitor de dilución CEMS.	NO / NO ₂ / NO _x
Teledyne	Model T400 	El analizador de absorción UV modelo T400 utiliza un sistema basado en la ley de Beer-Lambert para medir rangos bajos de ozono en el aire ambiente. Se pasa una señal de luz UV de 254 nm a través de la celda de muestra donde se absorbe en proporción a la cantidad de ozono presente. Periódicamente, una válvula de conmutación alterna la medición entre la corriente de muestra y una muestra que se ha lavado con ozono. El resultado es una medición de ozono verdadera y estable.	Ozono (O ₃)

Fuente: Teledyne Technologies (<http://www.teledyne.com/>) – Aeroqual (<https://www.aeroqual.com/>)

Tabla 23. (Continuación)

Marca	Equipo	Descripción	Contaminante a Monitorear
Teledyne	Model T102 	El analizador Modelo T102 TRS utiliza el probado principio de fluorescencia UV para medir el azufre reducido total a los niveles comúnmente requeridos para el monitoreo del aire ambiente. El modelo T102 utiliza un convertidor externo de alta temperatura establecido a 850 ° C para permitir la conversión de H₂S, metilmercaptano, dimetilsulfuro y metil-disulfuro a SO₂ a esta temperatura con una eficiencia superior al 98%.	TRS SO ₂
Teledyne	Model T101 	El analizador Modelo T101 H₂S utiliza el probado principio de fluorescencia UV para medir el sulfuro de hidrógeno a los niveles comúnmente requeridos para el monitoreo del aire ambiente. El modelo T101 está equipado con un convertidor catalítico montado internamente a 315 ° C para convertir H₂S en SO₂. Un modo de conmutación mide alternativamente H₂S y SO₂ mientras muestra ambas lecturas simultáneamente en la pantalla frontal.	SO ₂ H ₂ S
Teledyne	Model T701 	El T701 agrega conectividad Modbus TCP / IP a la confiabilidad y el rendimiento probados de nuestros sistemas de aire cero. Esto permite el monitoreo remoto de las funciones clave del instrumento, incluido el estado del punto de rocío, la temperatura del depurador, la temperatura de la caja y la presión de salida. El T701 incluye un sensor de punto de rocío, una bomba sin aceite y sin diafragma, y depuradores para eliminar SO₂, NO, NO₂, O₃, H₂S y NH₃. Depuradores opcionales de alto rendimiento están disponibles para eliminar CO e hidrocarburos	Aire Zero

Fuente: Teledyne Technologies (<http://www.teledyne.com/>) – Aeroqual (<https://www.aeroqual.com/>)

Tabla 23. (Continuación)

Marca	Equipo	Descripción	Contaminante a Monitorear
Aeroqual	Real-Time BTEX / Benzene Monitor 	El monitor BTEX proporciona mediciones precisas y específicas para benceno, etilbenceno, tolueno y xileno. Las mediciones individuales se registran en el instrumento y se transmiten al usuario a través de la interfaz de software basada en el navegador.	VOCs benceno, etilbenceno, tolueno y xileno

Fuente: Teledyne Technologies (<http://www.teledyne.com/>) – Aeroqual (<https://www.aeroqual.com/>)

- Equipos de Meteorología

Tabla 24. Especificaciones equipos de Monitoreo Meteorológico

Marca	Equipo	Descripción	Contaminante a Monitorear
Met one Instruments	083E 	Herramienta de medición de temperatura altamente sensible y estable que proporciona una precisión sobresaliente. Es confiable en el rango completo de condiciones de humedad relativa, de 0 a 100%, y funciona igualmente bien en entornos meteorológicos, industriales, de laboratorio y otros. El modelo 085 es un sensor combinado de humedad relativa / temperatura. Ambos sensores se pueden usar con una variedad de escudos de radiación.	Humedad Relativa $T_{ambiente}$

Fuente: Met one Instruments (<https://metone.com/>) - Gill Instruments (<http://www.gillinstruments.com/>) - HSA – Hydrological Services America (<https://www.hydrologicalusa.com/>)

Tabla 24. (Continuación)

Marca	Equipo	Descripción	Contaminante a Monitorear
Met one Instruments	094 	Sensor solar, Segunda Clase rendimiento al precio de un fotodiodo de silicio sensor, el piranómetro modelo 094 lo hace confiable, datos bancables más asequibles. Es una perfecta solución para aplicaciones desde prospección solar hasta servicios públicos sistemas de referencia de grado, a meteorología general.	
Gill Instruments	Windsonic 	Wind Sonic es un sensor de viento ultrasónico de 2 ejes, que proporciona datos de velocidad y dirección del viento a través de una serie de dos salidas analógicas.	Velocidad y Dirección de viento
HSA – Hydrological Services America	TB6 	El modelo TB6 del pluviómetro de cubeta de servicios hidrológicos es reconocido como el estándar mundial para medir la lluvia y la precipitación en ubicaciones remotas y desatendidas.	Precipitación

Fuente: Met one Instruments (<https://metone.com/>) - Gill Instruments (<http://www.gillinstruments.com/>) - HSA – Hydrological Services America (<https://www.hydrologicalusa.com/>)

6.3. Esquema modular representativo del SVCA

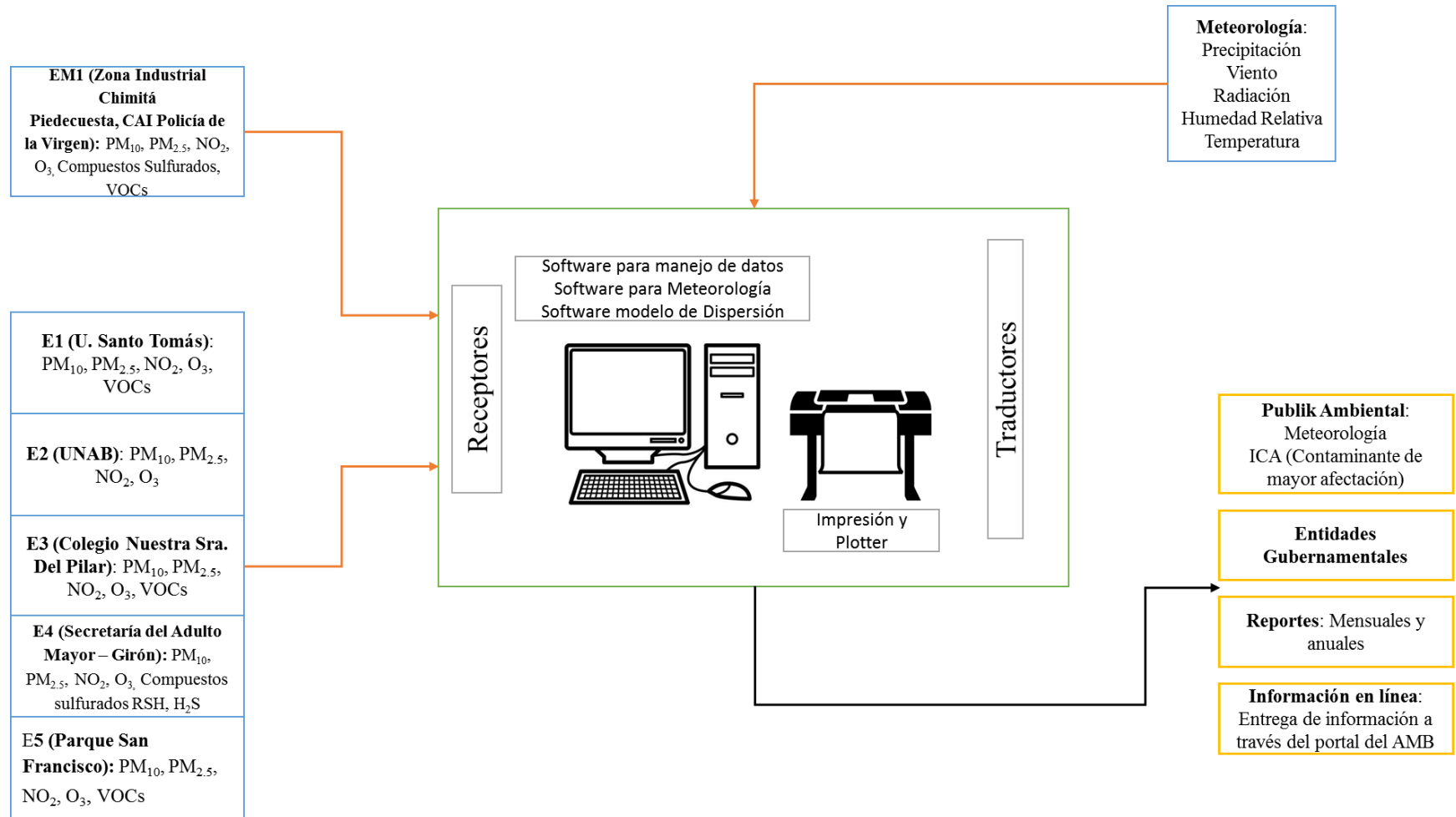


Figura 20. Arquitectura del SVCA propuesto

Fuente: Autor

En cuanto al empleo de herramientas para evaluar la *dispersión de contaminantes* en el ambiente atmosférico urbano, tanto a nivel comercial como en universidades y centros de investigación, se han venido desarrollando diversos tipos de modelos para uso según necesidades y conveniencia. El software AERMOD View, es uno de los modelos más usados y sugeridos por USEPA. Es un modelo Gaussiano que simula la dispersión de los contaminantes en el aire en estado estacionario, que realiza sus cálculos tomando en cuenta las características del terreno y la presencia de edificios cercanos a la fuente de emisión, que pueden afectar la dispersión. Además, utiliza algunos datos del clima de la capa atmosférica superior y a la fecha es considerado como un modelo de última generación. (Silva, A. 6 & Arcos, D., 2010)

El software AERMOD View tiene dos módulos preprocesadores de información, AERMET y AERMAP con el propósito de desarrollar sus tareas en el proceso de cálculo de la dispersión de contaminantes, para los cuales se requieren distintos datos de información.

AERMET se encarga del procesamiento de la información meteorológica horaria, como parámetros de entrada se requieren factores como precipitación, brillo solar, velocidad y dirección del viento, nubosidad, altura de nubes y temperatura. AERMAP se encarga del procesamiento de la información del terreno, rasgos fisiográficos y morfológicos de la zona de estudio. Adicional a esta información, se definen las fuentes (fijas y móviles) y los puntos donde se encuentran los receptores. (Arrieta, A., 2016)

Para el Software de manejo de datos y Meteorología, se recomienda seguir usando el que actualmente se tiene en la entidad reguladora de la calidad del aire, AMB manejando base de datos SQL.

En el apéndice A se puede observar la distribución geográfica de las estaciones del sistema propuesto.

7. Conclusiones y Recomendaciones

7.1. Conclusiones

A partir de la línea base sobre las condiciones geográficas, de clima y ambientales, típicas de la Zona Metropolitana de Bucaramanga, se han logrado definir las consideraciones técnicas aplicables en el diseño de un Sistema de Vigilancia de la Calidad del Aire para nuestra zona de interés.

Para fijar las consideraciones técnicas del sistema de vigilancia fue necesario configurar un modelo o estructura física de la zona, a través del cual fueron identificadas las necesidades con mayor facilidad y justificados cada uno de los criterios aplicados a dicho sistema.

Con base en el modelo geográfico alcanzado, se logró configurar la arquitectura modular para un SVCA aplicable a la ZMB. A partir de su configuración física, se definió el número de estaciones de monitoreo requeridas y su nueva localización, como también evaluar la posibilidad de ampliar el sistema actualmente en servicio, los contaminantes a monitorear, las tecnologías de analizadores y las opciones de almacenamiento, recuperación y manejo de los datos y registros.

Los contaminantes a monitorear se definieron a partir de las campañas, registros históricos y niveles de calidad del aire observados en el dominio del sistema, teniendo en cuenta las fuentes u origen del material emitido (localización real en campo y AP- 42 USEPA) y el grado de impacto. No fue necesario el uso de software para estimar la dispersión del contaminante en el presente trabajo, debido a la antigüedad, robustez y adecuada consistencia de los registros históricos utilizados.

Uno de los factores analizados con mucha atención en el diseño del SVCA, fue la meteorología de la zona, en particular la dirección y velocidad de los vientos predominantes. Sin

embargo, se observaron sectores donde los vientos son lentos (calma) por lo que los contaminantes permanecen mayor tiempo en el sitio, causando efectos perjudiciales a la salud de los habitantes y el ambiente.

El logro de una adecuada representatividad espacial para todo sistema radica en el correcto análisis de la zona de estudio o su dominio correspondiente. En nuestro caso, se logró evidenciar que las estaciones actuales, aunque generan un reporte ajustado al estado de la calidad del aire, se estima que tal información no es lo suficiente como para cubrir la extensión territorial de la ZMB. Por ejemplo, al norte del casco urbano donde el impacto por emisiones vehiculares es significativo, no se hace monitoreo y es una zona de alta densidad poblacional. Caso similar ocurre en el casco urbano del municipio de Floridablanca, situación que seguirá en aumento a raíz del continuo crecimiento de la ciudad.

Finalmente, del estudio realizado se obtuvo como resultado una nueva distribución territorial del SVCA que permite ampliar la escala de representatividad de los contaminantes, monitorear nuevas especies y automatizar la entrega de datos de campo hacia un futuro Centro de Recibo y Entrega de información a usuarios. Este centro podría ser instalado en el edificio central del Área Metropolitana, entidad manejadora del recurso aire.

7.2. Recomendaciones

Algunas de las recomendaciones aquí propuestas podrían ser útiles como un marco referencial previo al diseño de los sistemas de vigilancia de la calidad del aire para ciudades intermedias, cuyas características topográficas, meteorológicas y de población, sean similares a los municipios comprendidos dentro del AMB. Para el caso particular del AMB, objeto central del presente trabajo, se ofrecen las siguientes recomendaciones:

Dado que en la actualidad se tiene en funcionamiento un SVCA moderno con una cobertura geográfica y una representatividad espacial adecuada para responder a las necesidades de su diseño preliminar, conviene aunar esfuerzos para centralizar la información de las estaciones en línea y de esta manera, acudir al campo solo para revisar las estaciones para el mantenimiento preventivo o correctivo, en caso de ser necesario.

Adelantar una segunda fase del programa de control de la contaminación atmosférica para la ZMB gestionando un proyecto para ampliar la actual red, tanto en su cobertura geográfica, llegando a las zonas que en la actualidad no se cuenta con mecanismos de monitoreo de calidad de aire, como en las especies contaminantes a monitorear y vigilar, teniendo en cuenta los resultados obtenidos del inventario de emisiones con el que se cuenta a la fecha.

Durante el proceso distribución y macro localización de las estaciones en la zona de estudio es necesario evaluar las características de la zona y el impacto que tendría la escogencia del sitio para garantizar una buena representatividad espacial.

Previo a la etapa de rediseño del SVCA se debe seleccionar el software de dispersión de contaminantes del aire, el propuesto en el presente trabajo es uno de los más usados a nivel nacional y en diversos países. Una vez seleccionado y en servicio el software, se recomienda iniciar etapa de validación del mismo con base en los resultados in situ de las mediciones de calidad del aire que arroje el SVCA.

Establecer programas de caracterización y/o especiación de los compuestos orgánicos volátiles como VOC's y PM con el propósito de ampliar la gama de contaminantes del aire que podrían afectar la salud y establecer las estrategias de manejo para los mismos.

Establecer vínculos con las Autoridades de Tránsito locales a fin de activar programas conjuntos y de seguimiento en línea a las campañas de monitoreo de emisiones vehiculares que actualmente se realiza en la ZMB.

Establecer vínculos con Entidades Educativas para promover el tema de la contaminación atmosférica, realizar eventos a nivel de academia e involucrar a la comunidad en el cuidado y prevención de la misma. También es necesario considerar la ampliación de los programas de arborización en zonas de parques y separadores de vías para control de los gases de efecto invernadero (CO₂, etc.)

Bibliografía

- AMB, UIS. (s.f.). *Plan de gestión integral de residuos sólidos del Área metropolitana de Bucaramanga*. Obtenido de:
<http://versionantigua.bucaramanga.gov.co/documents/dependencias/DIAGNOSTICO%20FISCAL%20COMPILADO.pdf>
- AMB, ONUHABITAT . (s.f.). *Plan integral de desarrollo metropolitano 2016 – 2026*. Obtenido de Área Metropolitana de Bucaramanga : amb.gov.co/plan-integral-de-desarrollo-metropolitano-2016-2026/
- Área Metropolitana Valle de Aburrá . (s.f.). *Red Aire*. Obtenido de Metropol Medellín :
<https://www.metropol.gov.co/ambientales/aire/red-aire>
- Blanco, L., Miranda, V., Barraza, A., Junger, W., Hurtado, M., & Romieu, I. (2014). Effect of socioeconomic status on the association between air pollution and mortality in Bogota, Colombia. *Salud Publica México*, 56(4), 371-378.
- Capó, M. (2002). *Principios de ecotoxicología. Diagnóstico, tratamiento y gestión del medio ambiente*. Madrid: McGraw-Hill Interamericana de España.
- Cifuentes, L., Krupnick, A., O’Ryan, R., & Toman, M. (2005). *Urban Air Quality and Human Health in Latin America and the Caribbean*. Washington, D.C. : Organización Panamericana de la Salud.
- Colombia. Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. Resolución 1541. (2013). *Por el cual se establecen los niveles permisibles de calidad del aire y de emisión, el procedimiento para la evaluación de actividades que generan olores ofensivos y se dictan otras disposiciones* . Bogotá : Diario Oficial de Colombia, 15 de Noviembre de 2013.

Colombia. Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. Resolución 2254. (2017). *Por la cual se adopta la norma de calidad del aire ambiente y se dictan otras disposiciones.*

Bogotá: Diario Oficial de Colombia, 12 de Noviembre de 2017.

Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga. (marzo de 2016).

INFORME ANUAL DEL ESTADO DE LOS RECURSOS NATURALES 2015. Obtenido de CDMB: <http://www.cdmb.gov.co/web/images/Documentacion/gestion-institucional/calidad-ambiental/INFORME-ANUAL-RECURSOS-NATURALES-2015.pdf>

Evans, J., Levy, J., Hammitt, J., Santos, C., & Castillejos, M. (2002). Air Quality in the Mexico Megacity. *Springer Science+Business Media Dordrecht*, 105-106.

Green, J., & Sánchez, S. (marzo de 2013). *La Calidad del Aire en América Latina: Una Visión Panorámica.* Obtenido de Ministerio del Ambiente de Perú : <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/calidad-aire-america-latina-una-vision-panoramica>

Hlavay, J., Prohaska, T., Weisz, M., Wenzel, W., & Stingeder, G. (2004). Determination of trace elements bound to soil and sediment fractions. *Pure Appl*, 76, 415–442.

Horta, L. (6 de junio de 2019). *Alternativas para mejorar la calidad del aire en el área metropolitana de Bucaramanga.* Obtenido de El Espectador : <https://www.elespectador.com/noticias/nacional/santander/alternativas-para-mejorar-la-calidad-del-aire-en-el-area-metropolitana-de-bucaramanga-articulo-864555>

IDEAM. (2016). *Informe del Estado de la Calidad del Aire en Colombia 2011-2015.* Obtenido de Documentación Ideam :

http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023637/Informe_del_Estado_de_la_Calidad_del_Aire_en_Colombia_2011-2015_vfinal.pdf

IDEAM. (2018). *Informe del Estado de la Calidad del Aire en Colombia 2017*. Obtenido de IDEAM:

http://www.ideam.gov.co/documents/24277/72621342/Presentaci%C3%B3n_Informe_Estado_Calidad_Aire+2017.pdf/8a58e842-bc3b-4c91-80ae-71a7188516fa

Instituto Nacional de Ecología – INE. (s.f.a). *Manual 1: Principios de Medición de la Calidad del Aire*. Obtenido de Sinaica: <https://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/guias/1-%20Principios%20de%20Medici%C3%B3n%20de%20la%20Calidad%20del%20Aire.pdf>

Instituto Nacional de Ecología – INE. (s.f.b). *Manual 3: Redes Estaciones y Equipos de Medición de la Calidad del Aire*. Obtenido de Sinaica : <https://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/guias/3-%20Redes,%20Estaciones%20y%20Equipos%20de%20Medici%C3%B3n%20de%20la%20Calidad%20del%20Aire.pdf>

Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible . (2010). *Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire, manual de diseño de sistemas de vigilancia de la calidad del aire*. Bogotá : MADS.

Ministerio del Medio Ambien de Chile . (s.f.). *Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire*. Obtenido de SINCA : <https://sinca.mma.gob.cl/index.php/>

Prüss-Ustün, W., Corvalán, C., Bos, R., & Neira, M. (2016). *Preventing disease through healthy environments A global assessment of the burden of disease from environmental risks*. Obtenido de World Health Organization :

https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/204585/9789241565196_eng.pdf;jsessionid=9010082D845529256AF067835CC089C1?sequence=1

Pulido, A., Turriago, J., Jiménez, R., Torres, C., Rojas, A., Chaparro, N., . . . López, J. (2016).

Inventario Nacional y Departamental de Gases Efecto Invernadero - Colombia. Obtenido

de IDEAM - PNUD:

<http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023634/INGEI.pdf>

Quiroz, L., Hernandez, L., Agudelo, C., Medina, K., Robledo, R., & Osorio, S. (2013). PM10

exposurerelated respiratory symptoms and disease in children living in and near five coal-mining areas in the Cesar department of Colombia. *Revista de Salud Pública*, 15(1), 66-79.

Ramirez, A., Sarmiento, O., Duperly, J., Wai Wong, T., Rojas, N., & Arango, C. (2012). Should

they play outside? Cardiorespiratory fitness and air pollution among schoolchildren in Bogota. *Revista de Salud Pública*, 14(4), 570-583.

Rodriguez, L., Castro, H., & R. J. (2012). The effects of air pollution on respiratory health in

susceptible populations: a multilevel study in Bucaramanga, Colombia. *Cad Saude Publica*, 28(4), 749-757.

Rodríguez, L., Castro, H., Rey, J., Herrera, A., & Niederbacher, J. (2010). Contaminación

atmosférica y sus efectos en la salud en Bucaramanga. *Revista del Observatorio de Salud Pública de Santander*(1), 3-18.

Romero, P., Qin, H., & Borbor, M. (2013). Exploration of health risks related to air pollution and

temperature in three Latin American cities. *Soc Sci Med*(83), 110-118.

World Health Organization. (2016). *Ambient Air Pollution: A global assessment of exposure and*

burden of disease. Obtenido de WHO:

[https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/250141/9789241511353-
eng.pdf?sequence=1](https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/250141/9789241511353-eng.pdf?sequence=1)