

Fortalecimiento y transformación del sistema de vigilancia de calidad del aire en Colombia: hacia un enfoque integral de gestión de riesgo en salud pública

José Alejandro Murad Pedraza¹ 

Johan Camilo Ramírez-Franco² 

Rafael Arturo Puentes Puentes³ 

Recibido: 29/09/2025 Aceptado: 29/12/2025 Actualizado: 06/04/2026

DOI: 10.17151/luaz.2025.62.13

Resumen

El artículo presenta un análisis exhaustivo y una propuesta de reestructuración para los Sistemas de Vigilancia de Calidad del Aire (SVCA) en Colombia. Se identifica que la cobertura actual es insuficiente y está desigualmente distribuida, concentrándose principalmente en las grandes ciudades como Bogotá, Medellín y Cali, y dejando desprotegida a una parte significativa de la población urbana. El diagnóstico revela que, aunque existen 23 SVCA reportados, muchos no cumplen con los criterios técnicos mínimos de diseño, como el número y la tipología adecuada de estaciones según las directrices normativas. La normativa vigente, basada en resoluciones como la 650 de 2010 y la 2254 de 2017, obliga a implementar SVCA solo en municipios con más de 50.000 habitantes, lo que excluye a la gran mayoría de los municipios del país (solo el 9,3% están obligados) y limita la capacidad para detectar problemas de contaminación transfronterizos o en áreas más pequeñas.

Para solucionar estas deficiencias, la investigación propone una expansión ambiciosa y nacional del sistema. La propuesta central es la creación de un SVCA "Inicial" que cubra todos los cascos urbanos del país, categorizando los municipios por rangos de población y proponiendo un número mínimo específico de estaciones (fijas automáticas e indicativas con sensores electroquímicos) para cada categoría. Esto implica pasar de las 209 estaciones actuales a un sistema con más de 5.000 estaciones, sectorizado en tres regiones operativas (Norte, Centro y Sur). Se incluye una nueva tipología de estación "Ambiental" para medir fuentes de contaminación mixtas y se recomienda el uso de sensores electroquímicos de bajo costo para ampliar la cobertura espacial. La inversión total estimada para esta implementación es de aproximadamente 720 mil millones de pesos, una cifra comparable con otros grandes proyectos de infraestructura nacional, justificada por el objetivo de proteger la salud pública y contar con un sistema de alerta temprana ante la contaminación atmosférica.

Palabras clave: Contaminación Atmosférica, Monitoreo Ambiental, Gestión Ambiental, Legislación Ambiental, Sistema de Vigilancia, Calidad del Aire, Salud Pública.

Strengthening and Transforming Colombia's Air Quality Monitoring System: Toward a Comprehensive Approach to Public Health Risk Management

Abstract

This article presents a comprehensive analysis and a proposal for restructuring Colombia's Air Quality Monitoring Systems (SVCA). It identifies that current coverage is insufficient and unevenly distributed, concentrated mainly in large cities such as Bogotá, Medellín, and Cali, and leaving a significant portion of the urban population unprotected. The assessment reveals that, although there are 23 reported ACMS, many do not meet the minimum technical design criteria, such as the number and appropriate type of stations according to regulatory guidelines. Current regulations, based on resolutions such as Resolution 650 of 2010 and Resolution 2254 of 2017, require the implementation of SVCA only in municipalities with more than 50,000 inhabitants, which excludes the vast majority of the country's municipalities (only 9.3% are required to do so) and limits the ability to detect cross-border pollution problems or issues in smaller areas.

To address these shortcomings, the research proposes an ambitious, nationwide expansion of the system. The central proposal is the creation of an "Initial" SVCA covering all urban centers in the country, categorizing municipalities by population ranges and proposing a specific minimum number of stations (fixed automatic and indicative stations with electrochemical sensors) for each category. This entails moving from the current 209 stations to a system with more than 5,000 stations, divided into three operational regions (North, Central, and South). A new type of "Environmental" station is included to measure mixed pollution sources, and the use of low-cost electrochemical sensors is recommended to expand spatial coverage. The total estimated investment for this implementation is approximately 720 billion pesos, a figure comparable to other major national infrastructure projects, justified by the goal of protecting public health and establishing an early warning system for air pollution.

Keywords: Air Pollution, Environmental Monitoring, Environmental Management, Environmental Legislation, Surveillance System, Air Quality, Public Health.

Introducción

Las sustancias contaminantes en el aire afectan la salud humana y el ecosistema. Por ello, se evalúa la calidad del aire comparando su composición ideal con las concentraciones reales. Ciertas concentraciones de compuestos naturales y humanos causan enfermedades respiratorias, cardiovasculares y neurológicas (IDEAM, 2023). La OMS (Organización Mundial de la Salud) en adelante OMS, recomienda concentraciones máximas de contaminantes criterio para proteger la salud. Cumplir estas directrices indica buena calidad del aire; de lo contrario, es mala, y la gravedad del daño depende de la concentración de los contaminantes (Organización Mundial de la Salud, 2021).

Los contaminantes criterio, peligrosos para la salud y el ambiente, se clasifican en primarios (emitidos directamente) y secundarios (formados por la interacción de otros contaminantes con la radiación solar y el clima) (United States Environmental Protection Agency, 2015). Siendo los contaminantes primarios provienen de fuentes humanas y naturales (transporte, industrias, incendios, entre otros) e incluyen el Material Particulado (PM10 y PM2.5), dióxido de azufre (SO₂),

monóxido de carbono (CO) y óxidos de nitrógeno (NOX) (Fundación Naturgy, 2018). Mientras que los contaminantes secundarios, medidos en la calidad del aire, se forman en la atmósfera a partir de contaminantes primarios y compuestos presentes en el aire o por la radiación solar. El ozono troposférico (O₃), por ejemplo, se origina por los óxidos de nitrógeno (NOX) y los compuestos orgánicos volátiles (COV) emitidos por actividades industriales, en presencia de la radiación solar (IDEAM, 2023).

En 2016, el 54% de la población mundial vivía en grandes ciudades, generando un alto consumo energético y, por ende, una concentración de emisiones atmosféricas (Martínez et al., 2009) (. Los problemas de calidad del aire se dan principalmente en estas áreas urbanas e industriales. En Colombia, el 77,7% de la población residía en cabeceras municipales en 2018, y las imágenes satelitales muestran altas concentraciones de PM₁₀ y PM_{2.5} en Bogotá, Medellín y Cali (IDEAM, 2023). Las redes de monitoreo y los SVCA (Sistemas de Vigilancia de Calidad del Aire) en adelante SVCA, regulados por las Resoluciones 650 y 2154 de 2010, evalúan la calidad del aire en Colombia (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2019).

Este protocolo unifica los criterios para que las administraciones, autoridades ambientales (Corporaciones Autónomas regionales y urbanas), el Ministerio de Ambiente y el Sistema Nacional Ambiental identifiquen qué áreas deben implementar sistemas de medición de calidad del aire. Esto permite evaluar las concentraciones de contaminantes, verificar el cumplimiento normativo, calcular el índice de calidad del aire y declarar alertas o emergencias. El protocolo incluye dos guías: diseño y operación de los SVCA. La medición se clasifica por tecnología: equipos pasivos (sin succión), activos (manuales, semiautomáticos y automáticos - en tiempo real) y sensores remotos (medición a distancia) (Manual de Diseño de Sistemas de Vigilancia de Calidad Del Aire, 2010). La normativa colombiana sigue las directrices de la USEPA (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos) a través del CFR 40, que regula las concentraciones de los seis contaminantes criterio y los métodos de monitoreo para proteger la salud humana y los ecosistemas (United States Environmental Protection Agency, 2024).

Este artículo se deriva de una investigación más amplia cuyo objetivo principal es proponer la creación de una Agencia Nacional de Calidad del Aire en Colombia. Dicha agencia tendría la misión de administrar y gestionar integralmente el componente atmosférico a través de normativa eficaz, permisos de emisiones, la operación de un SVCA nacional unificado, la gestión de tasas retributivas y el desarrollo de modelos de dispersión atmosférica a diferentes escalas. El fin último es abordar la contaminación como un riesgo para la salud pública, integrarla en sistemas de alerta temprana y considerarla en el ordenamiento territorial.

En este contexto, el objetivo específico del presente artículo es realizar un diagnóstico exhaustivo de la cobertura y las limitaciones técnicas de los SVCA actuales en Colombia, analizar críticamente el marco normativo que los rige y, con base en ello, formular una propuesta detallada de reestructuración y expansión nacional del sistema. Dicha propuesta busca garantizar una cobertura universal en todos los cascos urbanos del país, mediante una arquitectura técnica escalable, sectorizada y financieramente viable, como un paso fundamental hacia un enfoque integral de gestión del riesgo en salud pública.

Materiales y Métodos

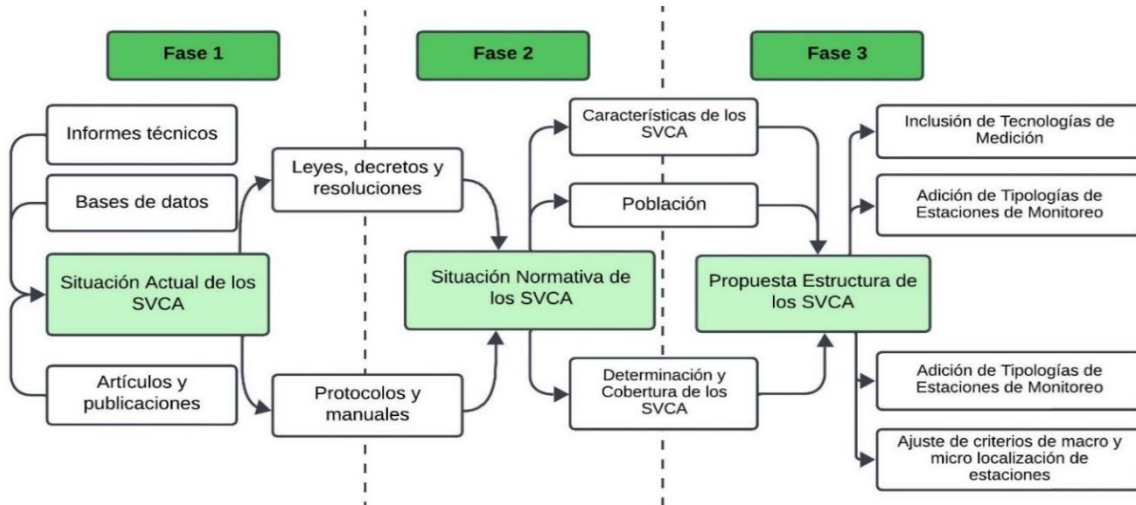
La investigación es de tipo aplicada, descriptiva-analítica y propositiva, que combina, toda vez que se realiza un diagnóstico descriptivo de la situación actual de los Sistemas de Vigilancia de Calidad del Aire (SVCA) en Colombia (cobertura, distribución, tecnología, cumplimiento normativo), bajo un análisis crítico de la normativa vigente y sus limitaciones, al igual que se plantea un diseño propositivo de una nueva estructura nacional para los SVCA, con una propuesta técnica, operativa y financiera detallada para su expansión y modernización.

En términos metodológicos, es un estudio de caso nacional que utiliza datos secundarios de entidades oficiales, revisión normativa y un enfoque de ingeniería conceptual para diseñar un sistema escalonado por población, con costos estimados y una nueva sectorización operativa.

Desde lo operativo se dividió en tres fases (Figura 1): diagnóstico de los SVCA actuales (cobertura y calidad del monitoreo), análisis de la normativa vigente y propuesta de modificación para la implementación de SVCA (tipologías, técnicas de medición y costos para cubrir los 1123 municipios y áreas no municipalizadas de Colombia). El objetivo es que la población urbana conozca los niveles de calidad del aire y se reduzca el riesgo por contaminación atmosférica.

La creación de la agencia administraría y gestionaría el componente atmosférico a través de normatividad eficaz, permisos de emisiones, operación del SVCA nacional, tasas retributivas y modelos de dispersión atmosférica (local, urbana, regional). El objetivo es enfocar la contaminación como un riesgo para la salud pública, integrarla en sistemas de alerta temprana y considerarla en el ordenamiento territorial para mejorar la calidad de vida en Colombia.

Figura 1. Metodología de Trabajo.



Fuente: elaboración propia.

Fase 1. Situación Actual de los SVCA

La información para el informe de 2023, elaborada por el IDEAM (Instituto de Hidrología Meteorología y Asuntos Ambientales), se basa en datos cargados por los operadores de los SVCA en

el Sisaire (Sistema de Información de Calidad del Aire) creado por la Resolución 651 de 2010. Este análisis contextualizará el número de SVCA operativos, su representatividad (tipos de estaciones y equipos, ubicación, cobertura) y la tecnología de medición utilizada.

Fase 2. Situación de Normatividad

Las regulaciones de calidad del aire se basan en las directrices de la OMS y la USEPA, según estudios que identifican los contaminantes atmosféricos perjudiciales para la salud humana. En este punto, se presentan y analizan los requisitos para implementar el monitoreo de calidad del aire en Colombia, de acuerdo con la Resolución 650 de 2010, que adopta manuales de diseño y operación de SVCA enfocados en tecnología de medición, tiempo y frecuencia de monitoreo, parámetros a medir, tipo, periodicidad y ubicación de estaciones e instrumentos meteorológicos.

Fase 3. Propuesta Estructura de los SVCA

La medición de calidad del aire, crucial para decisiones sobre contaminación, se basa en cuatro fundamentos: objetivo, tipo de muestreo, método/técnica y equipamiento. Estos permitieron complementar el manual de diseño de SVCA, ampliando técnicas, tipologías de estaciones, tiempos de monitoreo y muestreo, y contaminantes a medir. Su aplicación sería a nivel nacional, independientemente del número de habitantes o la existencia de problemas ambientales, para así establecer los costos de implementación y operación del SVCA.

Resultados y discusión

De acuerdo con la metodología y el desarrollo de cada una de las fases, se presentan los resultados bajo el desarrollo de las condiciones poblacionales 2025 y 2030 del DANE (Departamento Administrativo de Estadística)(DANE, 2024) y como es el comportamiento de la situación por departamento y sus municipios.

Situación actual de los Sistemas de Vigilancia de Calidad del Aire

En su informe de 2023, el IDEAM reportó 23 SVCA con 209 estaciones de monitoreo (192 fijas y 17 indicativas) en 19 departamentos y 94 municipios. El Área Metropolitana del Valle de Aburrá, la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca y la Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá tienen la mayor cantidad de estaciones, principalmente con tecnología automática(IDEAM, 2024). De las 192 estaciones fijas, 142 son automáticas y 62 son activas (manuales, semiautomáticas o híbridas).

Distribución de estaciones por departamento.

En Colombia, las estaciones de monitoreo que presentan mayor distribución son: Antioquia y Cundinamarca con 27,27% y 14,83% respectivamente, las de menor están los departamentos de Cauca, Huila, Meta, y Tolima por tener una representación oscilante del 0 a 1%.

Municipio por departamento y su representatividad en el territorio.

Teniendo como referencia la cantidad de municipios por departamento y por municipios que tienen estaciones, la mayor representatividad se presenta en La Guajira con un 33% y el menor es

Santander y Tolima con 2%. Cabe aclarar que Bogotá D.C. al ser un Distrito Capital autónomo, posee el 100% de la infraestructura en número de estaciones.

Municipios con más de 2 estaciones.

De las 209 estaciones de monitoreo, solo 154 integran un SVCA, pertenecientes a 38 de los 93 municipios con estaciones. Departamentos como Huila, Magdalena, Meta, Norte de Santander y Risaralda muestran una representatividad del 100%, ya que los 1 o 2 municipios que poseen, tienen igual o más de 2 estaciones (SVCA).

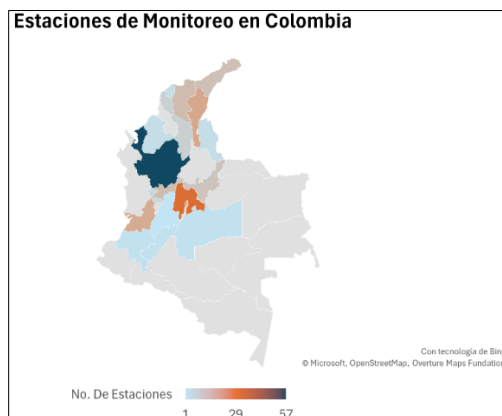
Población vinculada a los sistemas de vigilancia

De acuerdo con las proyecciones de población del DANE para los años de 2025 y 2030 los habitantes con relación a los SVCA, son de 22.587.534 y 22.964.961 respectivamente.

Situación por departamento y resultados finales

En 2023, Colombia contaba con 23 SVCA en 20 departamentos y 88 municipios, uno menos que el año anterior. Se observa un aumento en el uso de tecnologías automáticas y una disminución de estaciones manuales e híbridas (IDEAM, 2024). La [Figura 2](#) muestra la concentración de SVCA en las regiones Andina y Caribe, con limitaciones en la Amazonia, Pacífica, Orinoquia e Insular.

Figura 2. Estaciones fijas e indicativas por departamento.



Fuente: Autores.

Las Autoridades Ambientales son responsables de los SVCA, diseñados bajo sus lineamientos. Agrupaciones de equipos únicos en diferentes centros urbanos de una misma jurisdicción, como el "SVCA de la CAR de Cundinamarca" (Murad, 2023), se consideran más bien Redes de Monitoreo de Calidad del Aire (RMCA).

La selección de equipos de calidad del aire depende del presupuesto, sugiriéndose alternativas a la USEPA, como certificaciones de la Unión Europea o MCerts del Reino Unido (CSA Group, 2025). La inversión debe alinearse con los objetivos y alcance del monitoreo (Manual de Diseño de Sistemas de Vigilancia de Calidad Del Aire, 2010). Los equipos automáticos, aunque más costosos, ofrecen la ventaja de medir simultáneamente varios contaminantes criterio (hasta seis en algunos), mientras que los equipos activos suelen medir un máximo de dos.

Análisis de la Normatividad

La normatividad se encuentra distribuida, hacia dos ejes del componente atmosférico como son la resolución 2254 de 2017 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en la atmósfera y la resolución 650 de 2010 que contempla lo relacionado hacia la implementación de los SVCA.

Normatividad Vigente

La Resolución 2254 de 2017 establece concentraciones permisibles de contaminantes criterio basadas en estudios de la OMS, aunque Colombia, al ser un país en desarrollo con deficiencias en la gestión de la calidad del aire, adopta las recomendaciones como objetivos intermedios. Sin embargo, esta resolución establece una concentración permisible de material particulado más reducida para el año 2030 (Resolución 2254 de 2017: Por La Cual Se Adopta La Norma de Calidad Del Aire Ambiente y Se Dictan Otras Disposiciones, 2017). Las Resoluciones 650 y 2154 de 2010 definen los protocolos de diseño y operación de los SVCA, mientras que las Resoluciones 760 y 2153 de 2010 implementan protocolos para fuentes fijas. Finalmente, las Resoluciones 1632 y 1807 de 2012 regulan la altura de las chimeneas.

Población

Los municipios con más de 50.000 habitantes (102, el 9,3% del total en Colombia) deben implementar SVCA obligatoriamente. Sin embargo, también operan SVCA especiales por problemáticas ambientales específicas. La población colombiana se concentra principalmente en Bogotá, Medellín, Cali y Barranquilla (62,34%), ciudades con alta contaminación por vehículos (2,6 millones en Bogotá (Secretaría Distrital de Movilidad, 2025), y 2.6 millones en Medellín (Arbeláez, 2025) y otras fuentes (fijas, dispersas, resuspensión). La contaminación también se transporta a larga distancia (incendios de la Orinoquía/Amazonía a la región Andina, arena del Sahara). Un SVCA nacional, sin restricción poblacional, permitiría identificar estos fenómenos y generar alertas tempranas para proteger la salud pública.

Tipo de Tecnología

La elección de la tecnología para un SVCA debe concordar con sus objetivos de diseño, definiendo el tipo de monitoreo y muestreo (recolección de muestras, registros diarios, horarios o en tiempo real). Dada la alta inversión y operación de estaciones convencionales, se sugiere implementar tecnologías que permitan la medición simultánea de varios contaminantes para obtener datos suficientes para evaluar problemas ambientales y gestionar alertas. A largo plazo, se podría optar por tecnologías más avanzadas con alta calidad de datos, certificación y regulación, aunque con menor cobertura espacial.

Tiempo y Periodicidad del Monitoreo

Las limitaciones económicas y operativas han llevado a que muchos operadores de los Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire (SVCA) en países en desarrollo realicen mediciones únicamente en situaciones críticas, como durante eventos asociados al Fenómeno de El Niño, o de forma intermitente (por ejemplo, campañas cada tres años o mediciones en días alternos). Esta discontinuidad genera vacíos de información que dificultan la identificación de tendencias, la

evaluación de impactos en la salud y la formulación de políticas públicas efectivas (Snyder et al., 2013). En este sentido, resulta fundamental avanzar hacia esquemas de monitoreo continuo y permanente, que permitan capturar la variabilidad temporal de los contaminantes, construir series históricas robustas y facilitar la toma de decisiones oportunas orientadas a la mejora de la calidad del aire y la protección de la salud de la población.

Parámetros a Medir

Aunque el PM10 es un contaminante criterio importante en Colombia, medir solo uno puede dar una visión incompleta de la calidad del aire para las autoridades y la población. La selección de contaminantes debe considerar las emisiones de diversas fuentes, tanto dentro como fuera del área de estudio. Para una evaluación integral, se recomienda instalar equipos que midan todos los contaminantes criterio o usar tecnologías que permitan la medición simultánea de varios, con requisitos de infraestructura mínimos.

Número de Estaciones

Establecer un número fijo de estaciones no es viable, ya que depende de la distribución del viento y las características del área de estudio, pudiendo requerirse entre cuatro y treinta y dos estaciones de diferente tipología para obtener datos representativos. Es crucial considerar la presencia de receptores sensibles y realizar estudios micrometeorológicos y de dispersión atmosférica para determinar con precisión el número y ubicación de las estaciones, asegurando información robusta para estrategias de reducción de la contaminación.

Tipo de Estaciones

La tipología de cada estación debe corresponder a su ubicación y al objetivo del monitoreo, considerando la altura del muestreador, la distancia a fuentes de emisión y obstáculos. Cada estación debe tener un propósito específico; por ejemplo, una estación de tráfico no debe estar elevada ni cerca de muros que afecten la medición. Es importante categorizar las estaciones como Fondo, Fondo Urbano, Propósito Especial, Punto Crítico e Indicativas.

Periodicidad e incidencia del Muestreo

El muestreo debe ajustarse al tiempo de exposición de los contaminantes y al objetivo del estudio, aunque las limitaciones presupuestales a menudo restringen la frecuencia de medición, impactando la calidad del análisis. Para lograr datos comparables con las normas de calidad del aire, es crucial asegurar series temporales completas, reduciendo interrupciones y permitiendo la correlación con datos meteorológicos para evaluar la dispersión de contaminantes. Además, ante eventos adversos como la acumulación de contaminantes por condiciones climáticas o reportes negativos de calidad del aire, es importante implementar planes de contingencia y actuación para episodios críticos.

Instrumentación Meteorológica

La medición de variables meteorológicas en el sitio de monitoreo de calidad del aire es obligatoria y esencial para entender la dispersión de contaminantes. Variables como velocidad y dirección del viento (a 10 metros), humedad relativa, temperatura ambiente, presión barométrica, radiación solar y precipitación deben medirse con precisión y la misma frecuencia que los contaminantes. Esto

facilita la identificación de patrones atmosféricos y el desarrollo de estrategias de ordenamiento territorial y gestión del riesgo.

Propuesta de Estructura de los SVCA

Ajustes en aspectos generales

En primer lugar, la propuesta hace referencia al ajuste de las condiciones de los SVCA y la modificación de sus características, donde principalmente se consideran los siguiente:

- Inclusión del SVCA denominado inicial que hace referencia a la implementación de la medición en poblaciones menores a 50 mil habitantes en su casco urbano.
- Inclusión de la tecnología de medición sensores electroquímicos.
- Cambios en los tiempos de monitoreo.
- Cambio en la periodicidad de los monitoreos, en especial para el SVCA tipo industrial.
- Inclusión de contaminantes en todos los tipos de SVCA.
- Ajuste del número de estaciones previo a un análisis de distribución del viento.
- Inclusión de una tipología de estación dentro de un SVCA.
- Inclusión de un estudio técnico para la ubicación de las estaciones para que las mismas tengan un criterio técnico y bajo objetivos claros y precisos.
- Modificación de los tiempos de muestreo para garantizar una mayor cantidad de datos.
- Inclusión del tipo de estación meteorológica a emplear en cada estación de monitoreo de calidad del aire.

Propuesta de otras categorías

Para garantizar la medición de la calidad del aire en todos los cascos urbanos del país, se ha diseñado un SCVA denominado "Inicial", el cual se subdivide en tres categorías para asegurar un alcance diferencial según las tipologías de las estaciones a implementar. Estas categorías se establecen de la siguiente manera, teniendo como referencia la población del 2030:

- **Municipios con poblaciones entre 1.000 y 10.000 habitantes:** 715 municipios.
- **Municipios con poblaciones entre 10.000 y 20.000 habitantes:** 171 municipios.
- **Municipios con poblaciones entre 20.000 y 50.000 habitantes:** 114 cabeceras municipales.

Adicionalmente, se han definido otras categorías para municipios con mayor población:

- **Municipios con población entre 50.000 a 150.000 habitantes:** 61 municipios.
- **Municipios con población entre 150.000 a 500.000 habitantes:** 28 cabeceras municipales.
- **Municipios con población entre 500.000 a 1.5 millones de habitantes:** 11 municipios, principalmente capitales departamentales.
- **Municipios con población mayor de 1.5 millones de habitantes:** incluye ciudades como Bogotá D.C., Medellín y Cali.

Nueva Sectorización

Dado que se plantea una sectorización operativa de los SVCA en tres regiones (norte, centro y sur), la [figura 3](#) y [tabla 1](#) del anexo presenta la distribución de los departamentos según la división político-administrativa de Colombia y sus capitales. La cobertura por región se establece así:

Figura 3. Distribución de las subregiones para el manejo de la Calidad del Aire

Región Norte: Comprende 11 de los 33 departamentos del país, en su mayoría con acceso al mar Caribe, abarcando 392 municipios (35,5% del total) y alcanzando una cobertura del 33,3%.

Región Centro: Abarca 10 departamentos, donde se concentra la mayor parte de la población. Incluye 410 cabeceras municipales (37,2%) y representa el 30,3% del total.

Región Sur: Comprende 12 departamentos, incluyendo los de la Amazonía y parte del Pacífico colombiano, con 301 municipios (27,3%) y una cobertura del 36,4%.

Inclusión de la tecnología de medición sensores electroquímicos

La evaluación adecuada de la calidad del aire, con base en la mejor información científica y tecnológica disponible, requiere el uso de equipos de monitoreo que empleen métodos de referencia o métodos equivalentes, de acuerdo con los lineamientos establecidos por la United States Environmental Protection Agency (United States Environmental Protection Agency, 2016), conforme a lo dispuesto en el Título 40 del Código de Reglamentos Federales (40 CFR, Parte 53) y en documentos técnicos como el EPA Quality Assurance Handbook for Air Pollution Measurement Systems (United States Environmental Protection Agency, 2016, 2020). Estos equipos constituyen el estándar para la medición de contaminantes criterio y son los únicos reconocidos oficialmente para fines regulatorios y de cumplimiento normativo.

En los últimos años, los sensores electroquímicos y ópticos de bajo costo (como Cairnet®, Sensit, Kunak AIR Pro, Libelium, Laminart, entre otros) han ganado relevancia en la medición de la calidad del aire debido a su portabilidad, bajo costo y capacidad de transmisión de datos en tiempo real. Estos dispositivos permiten la detección principalmente de material particulado (PM), dióxido de nitrógeno (NO₂), monóxido de carbono (CO), ozono (O₃) y dióxido de azufre (SO₂), facilitando esquemas de vigilancia ambiental más accesibles y descentralizados (Spinelle et al., 2017). A diferencia de las estaciones automáticas convencionales, su facilidad de instalación posibilita el despliegue en múltiples puntos, ampliando la cobertura espacial del monitoreo (Morawska et al, 2018).






No obstante, es importante señalar que los sensores de bajo costo no se encuentran aprobados por la USEPA como métodos de referencia o equivalentes, por lo que no deben ser considerados sustitutos de los equipos oficiales de monitoreo, ni avalados de manera directa por la normatividad colombiana para fines regulatorios. Diversos estudios han demostrado que estos sensores presentan limitaciones asociadas a su precisión, estabilidad a largo plazo, sensibilidad a condiciones ambientales (temperatura y humedad) y variabilidad entre dispositivos, lo que puede comprometer

la calidad de los datos si no se aplican procedimientos rigurosos de control (Lewis et al., 2018; Mead et al., 2013).

En este contexto, la literatura científica y las recomendaciones técnicas internacionales sugieren que los sensores de bajo costo pueden ser utilizados de manera complementaria, principalmente para mediciones exploratorias, preliminares o indicativas, siempre que estén sujetos a procesos estrictos de evaluación, calibración y validación frente a analizadores de referencia o equivalentes (Clements et al., 2017; United States Environmental Protection Agency, 2025). El trabajo conjunto entre ambos tipos de tecnologías permite fortalecer los sistemas de vigilancia de la calidad del aire, atendiendo aspectos críticos como la calibración periódica, el mantenimiento preventivo y correctivo, el tiempo de vida útil y las condiciones adecuadas de operación, especialmente para los sensores de bajo costo, de acuerdo con protocolos técnicos definidos por la USEPA.

Por otra parte, los equipos automáticos de monitoreo, aunque implican mayores costos de adquisición, operación y mantenimiento, ofrecen la ventaja de medir simultáneamente varios contaminantes criterio — hasta seis en algunos sistemas — con alta confiabilidad y continuidad temporal, mientras que los equipos activos suelen limitarse a la medición de uno o dos contaminantes específicos (Seinfeld & Pandis, 2016; World Health Organization, 2006).

Tabla 1. Sensores electroquímicos para medir contaminantes criterio.

Sensores electroquímicos para la medición de PM ₁₀ , PM _{2.5} , SO ₂ , NO ₂ , O ₃					
PARÁMETROS	EQUIPO	EQUIPO	EQUIPO	EQUIPO	EQUIPO
CO, SO ₂ , O ₃ , NO ₂ , PM ₁₀ y PM _{2.5}					
Nombre	Cairnet®	Sensit	Kunak AIR Pro	Ibelium	Laminat
Empresa	Envea	Crowcon	Kunak®	Ibelium	aeron®
Método de medición	Sensores Electroquímicos	Gases – Electroquímico Partículas – Dispersión Laser	Tecnología GasPlug TM (patentada) Gases - Electroquímico Partículas - Contador óptico partículas	Sensores Electroquímicos	Sensores ópticos y electroquímicos
Especificaciones Técnicas	https://www.envea.global/es/s/ambiente/gas-monitors-a/cairnet/?compare=20423	https://www.crowcon.com/es/products/air-quality-monitors/ramp/#specs	https://www.kunak.es/productos/estaciones-de-control-de-calidad-del-aire	https://www.libelium.com/es/soluciones-iot/calidad-ambiental/	https://aeronsystems.com/iot/smart-air-quality-monitoring/

Fuente: Autores.

Inclusión de contaminantes en todos los tipos de SVCA.

La medición de contaminantes criterio (PM₁₀, PM_{2.5}, O₃, SO₂, NO₂, CO, Pb) y emergentes como el Black Carbon (BC) es fundamental para los sistemas de vigilancia de calidad del aire debido a su impacto en la salud pública y el cambio climático (Organización Mundial de la Salud, 2024). El monitoreo del BC es clave por su efecto en el calentamiento global y su relación con enfermedades (Bond et al., 2013). Esta información es esencial para políticas públicas y estrategias de mitigación en sectores clave (transporte, industria, energía) (IPCC (o Intergovernmental Panel on Climate Change), 2018), facilitando el cumplimiento normativo, la adopción de tecnologías limpias y el desarrollo sostenible (European Environment Agency, 2020). La Tabla 2 del anexo relaciona el

contaminante a medir con la tipología de la estación (fondo, punto crítico, tráfico, industrial, ambiental o propósito especial) y la tecnología de medición, recomendando sensores electroquímicos para todas las estaciones indicativas.

Ajuste del número de estaciones previo a un análisis de distribución del viento.

Después de reconocer el SVCA que se debe diseñar en cada territorio, se debe proceder a la identificación del número mínimo de estaciones indicativas o fijas que se recomienda implementar en cada cabecera municipal siempre tratando de contemplar estaciones acordes a las dimensiones y necesidades de la situación ambiental, es por ello en la Tabla 2 se identifica la necesidad del número mínimo de estaciones y su tipología por cada rango de población.

Tabla 2. Número de estaciones por tipología de SVCA.

TIPOLOGÍA DE LA ESTACIÓN	TIPO DE SVCA						
	Inicial		Indicativo	Básico	Intermedio	Avanzado	
	Población (miles de habitantes)						
	<10	10,01 -20	20,01 -50	50,01 -150	150.01 - 500	500,01 - 1.500	> 1.500
FONDO FIJA				1	1	1	2
FONDO INDICATIVA	1	1	2	2	4	8	16
FONDO URBANA FIJA				1	1	1	2
PUNTO CRÍTICO FIJA						1	2
AMBIENTAL FIJA				1	2	3	4
AMBIENTAL INDICATIVA	1	2	3				
TRÁFICO FIJA					1	2	5
TRÁFICO INDICATIVA	1	2	3	3	3	4	5
PROPÓSITO ESPECIAL FIJA							2
INDUSTRIAL FIJA							2
TOTAL	3	5	8	8	12	20	40

Fuente: Autores.

Según la [Tabla 2](#), un municipio de 5.000 habitantes requiere al menos tres estaciones indicativas con sensores electroquímicos para medir PM₁₀ y PM_{2.5}: una de fondo (vientos predominantes), una ambiental (zona urbana representativa) y una de tráfico (mayor flujo vehicular). Esta metodología se extiende a otros rangos del SVCA inicial, aumentando a cinco estaciones para poblaciones de 10.001-20.000 habitantes y a ocho para 20.001-50.000 habitantes.

En contraste, un municipio de 600.000 habitantes necesitaría un mínimo de 20 estaciones: 12 indicativas y 8 fijas con tecnología automática. Según la [Tabla 3](#) (resumen y despliegue en el anexo), se implementarían un total de 449 estaciones fijas y 4.587 indicativas. Los sensores electroquímicos se usarán principalmente en estaciones de tráfico, fondo y ambiental del SVCA Inicial, y como complemento en otros sistemas.

La distribución regional de estaciones

Seccional Norte: 1.966 estaciones, de las cuales 1.777 corresponden a sensores electroquímicos y 189 a estaciones fijas, representando el 38,7% y 42,1% del total, respectivamente.

Seccional Centro: 1.739 estaciones, con 1.582 sensores electroquímicos y 157 estaciones fijas, equivalentes al 34,5% y 35% del total nacional.

Seccional Sur: 1.331 estaciones, de las cuales 1.228 son sensores remotos y 103 estaciones fijas, lo que representa el 26,8% y 23%, respectivamente.

Tabla 3. Número de estaciones por seccional Norte, Centro y Sur

TIPOLOGÍA DE LA ESTACIÓN	TIPO DE SVCA							TOTAL	
	Inicial		Indicativo	Básico	Intermedio	Avanzado			
	Población (miles de habitantes)								
	<10	10.01 -20	20.01 -50	50.01 -150	150.01 - 500	500.01 -1.500			> 1.500
SECCIONAL NORTE									
Total Indicativos	324	275	328	120	21	72	0	1140	
Total Fijos	0	0	0	72	15	48	0	135	
SECCIONAL CENTRO									
Total Indicativos	1209	345	352	130	126	36	42	2240	
Total Fijos	0	0	0	78	90	24	38	230	
SECCIONAL SUR									
Total Indicativos	612	235	232	55	49	24	21	1228	
Total Fijos	0	0	0	33	35	16	19	103	
TOTAL									
No de SVCA	715	171	114	61	28	11	3	1103	
No de Sensores Electroquímicos	2145	855	912	305	196	132	63	4608	
No de Est Automáticas	0	0	0	183	140	88	57	468	

Fuente: Autores.

La [Tabla 4](#) muestra la distribución total de estaciones indicativas y fijas, evidenciando que las convencionales operan en poblaciones mayores de 50.000 habitantes, al igual que los SVCA de tipo Nacional con subsistemas regionales y locales para la gestión de la calidad del aire. Las estaciones indicativas de tráfico lideran con un 34% (1725 estaciones), seguidas por las de fondo (29%, 1484) y ambiental (28%, 1399). En cuanto a las estaciones fijas, la mayor cobertura es para la tipología ambiental (162 estaciones), seguida por fondo y fondo urbanas (1064 cada una), tráfico (65 estaciones), punto crítico (17 estaciones) y propósito especial (6 estaciones).

Tabla 4. Cantidad y representatividad por cada tipo de estación.

TIPO DE ESTACIÓN	No	%
FONDO FIJA	106	2%
FONDO INDICATIVA	1484	29%
FONDO URBANA FIJA	106	2%
PUNTO CRÍTICO FIJA	17	0%
AMBIENTAL FIJA	162	3%
AMBIENTAL INDICATIVA	1399	28%
TRÁFICO FIJA	65	1%
TRÁFICO INDICATIVA	1725	34%
PROPÓSITO ESPECIAL FIJA	6	0,12%
INDUSTRIAL FIJA	6	0,12%
TOTAL	5076	100%

Fuente: Autores.

Inclusión de una tipología de estación dentro de un SVCA.

La inclusión de una estación "Ambiental" como nueva tipología se justifica por:

- **Representatividad de la Exposición Humana:** Mide la calidad del aire en zonas con múltiples fuentes, reflejando mejor la exposición de la población y sus efectos en la salud.
- **Evaluación Integral de Contaminantes:** Permite medir contaminantes de diversas fuentes (industriales, comerciales, domésticas, transporte), ofreciendo una evaluación más completa que las estaciones con enfoques específicos.
- **Flexibilidad en la Ubicación:** Puede instalarse estratégicamente en zonas urbanas densas, cerca de infraestructuras de transporte o en regiones con dinámicas de emisión cambiantes.
- **Monitoreo de Dinámicas Cambiantes:** Captura las variaciones en las fuentes de emisión en ciudades en crecimiento o con cambios estacionales.
- **Fortalecimiento de la Gestión y Regulación:** Facilita la formulación de políticas públicas, estrategias de mitigación precisas y la evaluación del impacto de las medidas de reducción de emisiones.

En resumen, la estación ambiental complementa las tipologías actuales, permitiendo un monitoreo más flexible y representativo en áreas con múltiples fuentes, optimizando la gestión ambiental y la toma de decisiones.

Costos

Definir los costos de diseño y operación de los SVCA es crucial para su sostenibilidad y eficiencia, especialmente tras la actualización de tecnologías, la inclusión de municipios más pequeños, la transición a monitoreos permanentes (incluyendo black carbon), el aumento de estaciones y la incorporación de estaciones meteorológicas de precisión. Estos cambios exigen una planificación financiera detallada para optimizar recursos, asegurar el mantenimiento de equipos, fortalecer la capacidad técnica y garantizar datos confiables para la toma de decisiones y políticas públicas. La [Tabla 5](#) presenta los costos aproximados de la infraestructura por tipo de estación, y la [Tabla 6](#) muestra el costo de implementación de los SVCA por región para todas las cabeceras municipales (1103 municipios), según el número de estaciones requerido previamente.

Tabla 5. Costos necesarios para la infraestructura propuesta.

TIPO DE ESTACIÓN	TECNOLOGÍA	COSTO ADQUISICIÓN DE EQUIPOS	COSTO DE OPERACIÓN	COSTO DE MANTENIMIENTO	COSTO DE INSUMOS	COSTO ANUAL TOTAL	COSTO TOTAL
FONDO FIJA	AUTOMÁTICA	\$607.142.857	\$182.142.857	\$30.357.143	\$42.500.000	\$255.000.000	\$862.142.857
FONDO INDICATIVA	SENSOR ELECTROQUÍMICO	\$90.000.000	\$27.000.000	\$4.500.000	\$6.300.000	\$37.800.000	\$127.800.000
FONDO URBANA	AUTOMÁTICA	\$687.142.857	\$206.142.857	\$34.357.143	\$48.100.000	\$288.600.000	\$975.742.857
PUNTO CRÍTICO	AUTOMÁTICA	\$427.142.857	\$128.142.857	\$21.357.143	\$29.900.000	\$179.400.000	\$606.542.857
AMBIENTAL FIJA	AUTOMÁTICA	\$607.142.857	\$182.142.857	\$30.357.143	\$42.500.000	\$255.000.000	\$862.142.857
AMBIENTAL INDICATIVA	SENSOR ELECTROQUÍMICO	\$90.000.000	\$27.000.000	\$4.500.000	\$6.300.000	\$37.800.000	\$127.800.000
TRÁFICO FIJA	AUTOMÁTICA	\$807.142.857	\$242.142.857	\$40.357.143	\$56.500.000	\$339.000.000	\$1.146.142.857
TRÁFICO INDICATIVA	SENSOR ELECTROQUÍMICO	\$90.000.000	\$27.000.000	\$4.500.000	\$6.300.000	\$37.800.000	\$127.800.000
PROPÓSITO ESPECIAL FIJA	AUTOMÁTICA	\$807.142.857	\$242.142.857	\$40.357.143	\$56.500.000	\$339.000.000	\$1.146.142.857
INDUSTRIAL FIJA	AUTOMÁTICA	\$807.142.857	\$242.142.857	\$40.357.143	\$56.500.000	\$339.000.000	\$1.146.142.857
TOTAL		\$5.020.000.000	\$1.506.000.000	\$251.000.000	\$351.400.000	\$2.108.400.000	\$7.128.400.000

Fuente: Autores.

Tabla 6. Costos para cada seccional Norte, Centro y Sur

TIPO DE ESTACIÓN	TECNOLOGÍA	COSTOS ADQUISICIÓN EQUIPOS DE MONITOREO						TOTAL
		NORTE	COSTO	CENTRO	COSTO	SUR	COSTO	
FONDO FIJA	AUTOMÁTICA	33	\$20.035.714.286	51	\$ 30.964.285.714	22	\$ 13.357.142.857	\$ 64.357.142.857
FONDO INDICATIVA	SENSOR ELECTROQUÍMICO	353	\$31.770.000.000	740	\$ 66.600.000.000	391	\$ 35.190.000.000	\$133.560.000.000
FONDO URBANA	AUTOMÁTICA	33	\$22.675.714.286	51	\$ 35.044.285.714	22	\$ 15.117.142.857	\$ 72.837.142.857
PUNTO CRÍTICO	AUTOMÁTICA	6	\$ 2.562.857.143	7	\$ 2.990.000.000	4	\$ 1.708.571.429	\$ 7.261.428.571
AMBIENTAL FIJA	AUTOMÁTICA	48	\$ 29.142.857.143	79	\$ 47.964.285.714	35	\$ 21.250.000.000	\$ 98.357.142.857
AMBIENTAL INDICATIVA	SENSOR ELECTROQUÍMICO	341	\$ 30.690.000.000	673	\$ 60.570.000.000	385	\$ 34.650.000.000	\$125.910.000.000
TRÁFICO FIJA	AUTOMÁTICA	15	\$ 12.107.142.857	34	\$ 27.442.857.143	16	\$ 12.914.285.714	\$ 52.464.285.714
TRÁFICO INDICATIVA	SENSOR ELECTROQUÍMICO	446	\$ 40.140.000.000	827	\$ 74.430.000.000	452	\$ 40.680.000.000	\$155.250.000.000
PROPÓSITO ESPECIAL FIJA	AUTOMÁTICA	0	\$ -	4	\$ 3.228.571.429	2	\$ 1.614.285.714	\$ 4.842.857.143
INDUSTRIAL FIJA	AUTOMÁTICA	0	\$ -	4	\$ 3.228.571.429	2	\$ 1.614.285.714	\$ 4.842.857.143
TOTAL			\$189.124.285.714		\$352.462.857.143		\$178.095.714.286	\$719.682.857.143

Fuente: Autores.

El costo total estimado para ajustar el SVCA es de 720 mil millones de pesos (unos 177,7 millones de dólares), cubriendo el 73,9% de la población urbana proyectada para 2030. Este valor es comparable con otros proyectos de infraestructura y desarrollo a nivel nacional:

Vial: Proyecto Ruta del Sol 3 (crédito de 400 mil millones de pesos). (Ministerio de Transporte, 2024)

Ambiental: Plan Nacional de Biodiversidad (inversión de 76,5 billones de pesos hasta 2030) (El país, 2024) y PTAR Canoas (costo estimado de más de 6 billones de pesos) (Forbes Colombia, 2024).

Energético: Proyecto Hidroeléctrico Ituango (costo final estimado en 20 billones de pesos) (Portafolio, 2024).

Transporte: Túnel de Oriente (costo de 1,1 billones de pesos) (Gobernación de Antioquia, 2024; La República, 2024).

Educación y Turismo: Inversiones de 147 mil millones de pesos para competitividad turística (Presidencia de la República de Colombia, 2024), 70 mil millones para la Facultad de Artes de la Universidad Nacional (Ministerio de Educación Nacional, 2024) y 52 mil millones para la sede de la Universidad del Valle en Suárez, Cauca (Monroy, 2023).

Estos ejemplos resaltan la magnitud e impacto potencial del ajuste al SVCA, equiparándose con inversiones clave en diversos sectores y reafirmando la importancia de su sostenibilidad y operatividad a largo plazo.

Discusión

La propuesta de un Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire (SVCA) de cobertura universal para Colombia se puede enriquecer al contrastarla con las experiencias de países latinoamericanos líderes en la materia, como México, Brasil y Chile. México, a través del Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire (SINAICA), cuenta con una de las redes más extensas y consolidadas de la región, integrando datos de múltiples ciudades y estableciendo protocolos robustos. Sin embargo, su cobertura aún presenta disparidades significativas entre zonas metropolitanas y áreas rurales o semiurbanas, un desafío que la propuesta colombiana aborda de raíz al priorizar los cascos urbanos de todos los municipios, independientemente de su tamaño.

Brasil, por su parte, ha avanzado notablemente en la monitorización automática y en tiempo real en grandes metrópolis como São Paulo y Río de Janeiro, y cuenta con una legislación ambiental progresista. No obstante, la descentralización de la gestión ambiental entre los estados ha generado heterogeneidad en la densidad y calidad de las redes de monitoreo, limitando una visión integral nacional. La sectorización operativa (Norte, Centro, Sur) y la estandarización técnica propuesta para Colombia buscan superar esta fragmentación, estableciendo un modelo escalable y uniforme.

Chile destaca por implementar Planes de Descontaminación Atmosférica (PDA) basados en datos de monitoreo continuo y por su liderazgo en la regulación de material particulado fino (PM2.5). Su sistema, aunque técnicamente avanzado, se concentra principalmente en las zonas declaradas como saturadas o latentes, dejando fuera a una gran parte del territorio. La creación del SVCA "Inicial" en Colombia representa un enfoque preventivo y proactivo, que busca generar datos de línea base en todo el país antes de que se alcancen estados críticos de contaminación, alineándose así con un enfoque de gestión temprana del riesgo.

En este contexto, la propuesta colombiana se distingue por su ambición de cobertura geográfica universal y su enfoque escalonado y diferenciado por tamaño poblacional, combinando tecnologías de costo ajustado (sensores electroquímicos) con estaciones de referencia. Esto podría posicionar a Colombia como un referente regional en la construcción de un sistema de vigilancia que prioriza la equidad en el acceso a información sobre calidad del aire, sirviendo como herramienta fundamental para la gestión integral de la salud pública a escala nacional.

Conclusiones

Colombia posee actualmente un total de 23 SVCA de acuerdo al Informe de Calidad del Aire 2023 del IDEAM, sin embargo, realizando el análisis de las características que se contemplan en el diseño de este tipo de infraestructura solamente quedan 22 SVCA y corresponden principalmente a ciudades capitales como Bogotá, Medellín, Cali, Cartagena y Manizales o donde se presentan problemáticas ambientales como Sogamoso, La Estrella, Barbosa, El Paso, La Jagua de Ibirico, Barrancas, entre otros.

De las 32 capitales de departamento del país, tan solo 10 cuentan con algún equipamiento para la medición de la calidad del aire y de éstos 5 cumplen con el número mínimo de estaciones para la medición de la concentración de contaminantes, sin que esto llega a indicar que se cumplen con los criterios de macro y micro localización como del número de estaciones por tipología.

Los informes de calidad del aire realizados por el IDEAM deberían establecer un análisis diferencial de las concentraciones reportadas por las diferentes tipologías de estaciones de monitoreo de calidad del aire, esto determina que, si las fuentes móviles son las que en su mayoría causan el problema de contaminación atmosférica, son de este tipo las que en mayoría debería tener instaladas en los SVCA.

Los SVCA por estar vinculados en primera instancia a una población mayor de 50 mil habitantes, de los 1103 municipios que posee Colombia, solo el 9,3% están bajo esta condición y de ellos el 91% tienen implementado alguna infraestructura para la medición de calidad del aire y en consecuencia el 42% cumple con los requerimientos mínimos exigidos para el diseño y operación de SVCA.

En cuanto a cobertura de número de habitantes si es relevante, toda vez que el país a 2025 tiene 40.437.553 habitantes en su área urbana y el 65.3% tiene dentro de su área algún equipamiento para la medición de la calidad del aire y de ellos 12.738.842 habitantes solo son de las 3 grandes ciudades Bogotá, Medellín y Cali que cubre el 31,5%.

El diseño del Sistema de Vigilancia de la Calidad del Aire (SVCA) Inicial garantiza una cobertura nacional diferenciada según el tamaño poblacional de los municipios, asegurando que todas las cabeceras urbanas cuenten con estaciones de monitoreo adecuadas. Además, la sectorización en tres regiones operativas (norte, centro y sur) permite una distribución estratégica de los recursos y facilita la gestión ambiental en función de las características geográficas y demográficas del país.

Esta estructura optimiza la recolección de datos y fortalece la toma de decisiones para la mejora de la calidad del aire en Colombia.

La incorporación de una estación ambiental dentro de las tipologías de monitoreo de calidad del aire representa una estrategia clave para mejorar la evaluación de la contaminación atmosférica. Su capacidad para medir contaminantes de fuentes mixtas, su flexibilidad en la ubicación y su potencial para capturar dinámicas cambiantes hacen que sea una herramienta fundamental en la gestión de la calidad del aire. Además, su implementación fortalecería la regulación ambiental y la formulación de políticas públicas más eficaces, permitiendo una toma de decisiones basada en información representativa y actualizada sobre la exposición de la población a los contaminantes atmosféricos.

La planificación y distribución de las estaciones de monitoreo del Sistema de Vigilancia de la Calidad del Aire (SVCA) deben ajustarse a la densidad poblacional y las características urbanas de cada municipio para garantizar mediciones representativas y efectivas. En municipios pequeños, con hasta 50.000 habitantes, se establece un esquema progresivo que varía entre tres y ocho estaciones, mientras que, en ciudades más grandes, como aquellas con 600.000 habitantes, se requieren al menos 20 estaciones, combinando tecnología indicativa y fija.

A nivel nacional, la implementación de 4.051 estaciones indicativas y 398 estaciones fijas refleja la importancia de un monitoreo detallado y descentralizado. La distribución regional evidencia la mayor concentración de estaciones en la Seccional Norte, seguida por la Centro y la Sur, respondiendo a factores como actividad económica, concentración demográfica y patrones de contaminación. Esta estrategia permite optimizar la cobertura del SVCA, asegurando datos precisos para la toma de decisiones en gestión.

El costo del Sistema de Vigilancia de la Calidad del Aire (SVCA) en Colombia, estimado en 704.000 millones de pesos (171 millones de dólares), es una inversión significativa pero comparable con otros grandes proyectos de infraestructura, saneamiento, energía y educación en el país. Su relevancia radica en la importancia de contar con un monitoreo continuo y preciso de la calidad del aire, fundamental para la toma de decisiones ambientales y de salud pública. La comparación con proyectos como Hidroituango, la PTAR Canoas y el Túnel de Oriente demuestra que garantizar la operatividad y sostenibilidad del SVCA a largo plazo requiere una visión estratégica y un compromiso financiero similar al de estas iniciativas. Así, invertir en la vigilancia de la calidad del aire no solo fortalece la gestión ambiental, sino que también contribuye al bienestar de la población, al desarrollo sostenible del país y a tener un sistema de alertas tempranas en materia de contaminación atmosférica.

Referencias bibliográficas

- Arbeláez, M. (2025). *Los alarmantes números del crecimiento del parque automotor en el valle de aburra*. TA Noticias (Teleantioquia). <https://www.teleantioquia.co/noticias/los-alarman-tes-numeros-del-crecimiento-del-parque-automotor-en-el-valle-de-aburra/>
- Bond, T. C., Doherty, S. J., Fahey, D. W., Forster, P. M., Berntsen, T., DeAngelo, B. J., & Zender, C. S. (2013). Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(11). <https://doi.org/10.1002/jgrd.50171>
- CSA Group. (2025). *MCERTS Certified Products: Continuous Water Monitoring System Part 1 – Automatic Wastewater Sampling Equipment*. [https://www.csagroup.org/...](https://www.csagroup.org/)
- DANE. (2024). *Proyecciones de Población*.
- El país. (2024). Seis metas y 76 billones de pesos: El plan de Colombia para atacar la pérdida de biodiversidad. El País. <https://elpais.com/america-colombia/2024-10-22/seis-metas-y-76-billones-de-pesos-el-plan-de-colombia-para-atacar-la-perdida-de-biodiversidad.html>

- European Environment Agency. (2020). *Air quality in Europe — 2020 report*. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/air-quality-in-europe-2020-report>
- Forbes Colombia. (2024). Esta es la hoja de ruta de la Empresa de Acueducto para garantizar el suministro de agua a Bogotá más allá del 2040. *Forbes Colombia*. <https://forbes.co/2024/04/18/actualidad/esta-es-la-hoja-de-ruta-de-la-empresa-de-acueducto-para-garantizar-el-suministro-de-agua-a-bogota-mas-alla-del-2040>
- Fundación Naturgy. (2018). *Calidad del aire. Un reto mundial*. <https://www.fundacionnaturgy.org/wp-content/uploads/2018/06/calidad-del-aire-reto-mundial.pdf>
- Gobernación de Antioquia. (2024). *Gobernadores del país visitarán obras de Hidroituango y el Túnel de Oriente*. <https://www.antioquia.gov.co/component/k2/item/24992-gobernadores-del-pais-visitaran-obras-de-hidroituango-y-el-tunel-de-orient>
- Holland & Knight. (2024). *Avance en el gigantesco proyecto para el tratamiento de aguas residuales en Bogotá*. Holland & Knight. <https://www.hklaw.com/es/insights/publications/2024/02/advancement-in-the-giant-project-for-wastewater-treatment-in-bogota>
- IDEAM. (2023). *Informe del Estado de la Calidad del Aire en Colombia 2022*. <http://www.ideam.gov.co/web/contaminacion-y-calidad-ambiental/calidad-del-aire/informes-del-estado-de-la-calidad-del-air>
- IDEAM. (2024). *Informe del Estado de la Calidad del Aire en Colombia 2023*. <https://storymaps.arcgis.com/stories/8d565731dfb1413eb679f9bd904de1c5>
- IPCC (o Intergovernmental Panel on Climate Change). (2018). *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report*. <https://www.ipcc.ch/sr15/>
- La República. (2024). Tras invertir 1,1 billones, el Túnel de Oriente funcionará desde esta semana. *Diario La República*. <https://www.larepublica.co/economia/tras-invertir-1-1-billones-el-tunel-de-orientefuncionara-desde-esta-semana-3791090>
- Lewis, A., Von Schneidemesser, E., & Peltier, R. E. (2018). Low-cost sensors for the measurement of atmospheric composition: overview of topic and future applications. *Chemical Reviews*, 118(10). <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00072>
- Manual de Diseño de Sistemas de Vigilancia de Calidad Del Aire, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2010). <https://corponarino.gov.co/expedientes/calidadambiental/manualdexdisenosvca.pdf>
- Manual de Operación de Sistemas de Vigilancia de La Calidad Del Aire, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2010). https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/Protocolo_Calidad_del_Aire_-_Manual_Operacion.pdf
- Martínez, E., Bedoya, J., Correa, M., Muñoz, A., Paz, J., & Morales, O. (2009). Diagnóstico de la Contaminación Atmosférica en el Valle del Aburrá. *Revista Dyna*, 76(158), 197–211. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532009000200001

- Mead, M. I., Popoola, O. A. M., Stewart, G. B., Landshoff, P., Calleja, M., Hayes, M., Baldovi, J. J., McLeod, M. W., Hodgson, T. F., Dicks, J., Lewis, A., Moran, J., & Jones, R. L. (2013). The use of electrochemical sensors for monitoring urban air quality in low-cost, high-density networks. *Atmospheric Environment*, 70, 183–203. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.11.060>
- Ministerio de Educación Nacional. (2024). *Gobierno Nacional destina 70 mil millones para infraestructura física en la Universidad Nacional de Colombia*. <https://www.mineducacion.gov.co/portal/salaprensa/Noticias/421462:Gobierno-Nacional-destina-70-mil-millones-para-infraestructura-fisica-en-la-Universidad-Nacional-de-Colombia>
- Ministerio de Transporte. (2024). *Proyecto Ruta del Sol 3 logra crédito por 400 mil millones de pesos para finalizar obras*. <https://www.mintransporte.gov.co/publicaciones/11756/proyecto-ruta-del-sol-3-logra-credito-por-400-mil-millones-de-pesos-para-finalizar-obras>
- Morawska, L., Thai, P. K., Liu, X., Asumadu-Sakyi, A., Ayoko, G., Bartonova, A., Bedini, A., Chai, F., Christensen, B., Dunbabin, M., Knibbs, L. D., Kwok, P., Loh, M., Mazaheri, M., Mueller, J. F., Namdeo, A., Rice, P., Rigby, M., Salmond, J., ... Williams, R. (2018). Applications of low-cost sensing technologies for air quality monitoring and exposure assessment: How far have they gone? *Environment International*, 116, 286–299.
- Murad, J. (2023). *Formulación del sistema de Administración y Gestión del recurso aire en Colombia* [Doctoral Thesis (Tesis doctoral)]. Universidad Benito Juárez G.
- Organización Mundial de la Salud. (2021, September 22). *New WHO Global Air Quality Guidelines aim to save millions of lives from air pollution*. World Health Organization News. <https://www.who.int/es/news/item/22-09-2021-new-who-global-air-quality-guidelines-aim-to-save-millions-of-lives-from-air-pollution>
- Organización Mundial de la Salud. (2024). *Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire: partículas en suspensión (PM2.5 y PM10), ozono, dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre y monóxido de carbono*. <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/346062/9789240035461-spa.pdf>
- Portafolio. (2024). EPM actualiza el costo del Proyecto Hidroituango. *Diario Portafolio*. <https://www.portafolio.co/negocios/empresas/epm-actualiza-el-costo-del-proyecto-hidroituango-600324>
- Presidencia de la República de Colombia. (2024). *El Ministerio de Comercio, Industria y Turismo, a través de Fontur, invirtió \$146.904 millones para fortalecer el turismo en Colombia durante 2024*. <https://fontur.com.co/es/comunicados/el-ministerio-de-comercio-industria-y-turismo-traves-de-fontur-invirtio-146904-millones>
- Resolución 2254 de 2017: Por La Cual Se Adopta La Norma de Calidad Del Aire Ambiente y Se Dictan Otras Disposiciones, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2017). <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/Resolucion-2254-de-2017.pdf>

- Secretaría Distrital de Movilidad. (2025). *Movilidad en cifras: Registro distrital automotor*. Observatorio de Movilidad de Bogotá. <https://observatorio.movilidadbogota.gov.co/movilidad-en-cifras/registro-distrital-automotor/>
- Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2016). *Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change* (3rd ed., Vol. 1). Wiley.
- Snyder, E. G., Watkins, T. H., Solomon, P. A., Thoma, E. D., Williams, R. W., Hagler, G. S. W., Shelow, D., Hindin, D. A., Kilaru, V. J., & Preuss, P. W. (2013). The Changing Paradigm of Air Pollution Monitoring. *Environmental Science & Technology*, 47(20), 11369–11377. <https://doi.org/10.1021/es4022602>
- Spinelle, L., Gerboles, M., Villani, M. G., Aleixandre, M., & Bonavitacola, F. (2017). Field calibration of a cluster of low-cost commercially available sensors for air quality monitoring. Part B: NO, CO and CO₂. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 238, 706–715. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.07.036>
- United States Environmental Protection Agency. (2015). *Criteria Air Pollutants*. https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-10/documents/ace3_criteria_air_pollutants.pdf
- United States Environmental Protection Agency. (2017). *Quality Assurance Handbook for Air Pollution Measurement Systems, Volume II: Ambient Air Quality Monitoring Program*. https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-10/documents/final_handbook_document_1_17.pdf
- United States Environmental Protection Agency. (2022). *Air Sensor Guidebook*. <https://www.epa.gov/air-sensor-toolbox/air-sensor-guidebook>
- United States Environmental Protection Agency. (2024). *Criteria Air Pollutants*. US EPA Official Website. <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants>
- United States Environmental Protection Agency. (2025). *List of Designated Reference and Equivalent Methods*. https://www.epa.gov/system/files/documents/2025-06/amtic-list-june-2025_final-508-compliant.pdf
- World Health Organization. (2006). *Air Quality Guidelines: Global Update 2005. Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide*. <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/107823/9789289021920-eng.pdf>
- World Health Organization. (2016). *Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease*. <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/250141/9789241511353-eng.pdf>
- Zheng, T., Bergin, M. H., Johnson, K. K., Tripathi, S. N., Tripathi, S. N., Shirodkar, S., Low, M. S., & Emberson, L. S. (2017). Calibration of Low-Cost Particulate Matter Sensors: Model Development and Application. *Sensors*, 17(11). <https://doi.org/10.3390/s17112478>

1. PhD Dirección de Proyectos, Docente Asociado Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: jamuradp@udistrital.edu.co – ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4211-2601> - Google Scholar: https://scholar.google.com/citations?view_op=list_works&hl=es&user=8ztObgIAAAAJ

2. Magister en Energías Renovables, Auxiliar de Laboratorio de Calidad del Aire, Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: jcamirezf@udistrital.edu.co. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4983-7143> - Google Scholar: <https://scholar.google.com/citations?user=FhagcvoAAAAJ&hl=es>

3. Tecn Saneamiento Ambiental, Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. Correo Electrónico: rapuentesp@udistrital.edu.co. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-7034-6552> - Google Scholar: <https://scholar.google.com/citations?hl=es&user=mxianFIAAAAJ>

Para citar este artículo: Murad Pedraza, J. A., Ramírez-Franco, J. C., & Puentes Puentes, R. A. (2026). Fortalecimiento y Transformación del Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire en Colombia: Hacia un Enfoque Integral de Gestión de Riesgo en Salud Pública. *Revista Luna azul*, 62, 232-253 DOI: <https://doi.org/10.17151/luaz.2026.62.13>

Esta obra está bajo una [Licencia de Creative Commons Reconocimiento CC BY](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



Código QR del artículo

