

**EVALUACIÓN DE LA RED CIUDADANA PERTENECIENTE AL OBSERVATORIO
AMBIENTAL DE LA COMUNA 22 DE SANTIAGO DE CALI EN SUS ASPECTOS DE
MONITOREO Y GOBERNANZA EN LA CALIDAD DEL AIRE.**

Presentado por:

**JOHAN FELIPE CORREA ORDOÑEZ
201910223**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE RECURSOS NATURALES Y DEL AMBIENTE
EIDENAR
PROGRAMA DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL
SANTIAGO DE CALI
MARZO DEL 2026**

**EVALUACIÓN DE LA RED CIUDADANA PERTENECIENTE AL OBSERVATORIO
AMBIENTAL DE LA COMUNA 22 DE SANTIAGO DE CALI EN SUS ASPECTOS DE
MONITOREO Y GOBERNANZA EN LA CALIDAD DEL AIRE.**

Presentado por:

JOHAN FELIPE CORREA ORDOÑEZ
201910223

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Sanitario y Ambiental

Director:

Ing. PhD. JUAN PABLO SILVA VINASCO

Codirector:

Ing. HIRAN JEISON FLÓREZ PINZÓN

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE RECURSOS NATURALES Y DEL AMBIENTE
EIDENAR
PROGRAMA DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL
SANTIAGO DE CALI
MARZO DEL 2026**

RESUMEN

El presente trabajo evalúa la Red Ciudadana del Observatorio Ambiental de la Comuna 22 de Santiago de Cali (OAC22) en sus dimensiones de monitoreo y gobernanza de la calidad del aire, con énfasis en material particulado ($PM_{2.5}$). Para ello, se realizó un diagnóstico técnico de la red a partir de la información pública del observatorio, identificando 18 nodos de medición soportados en sensores de bajo costo, y se analizó el comportamiento espacio-temporal de las concentraciones para dos periodos de estudio (febrero–diciembre de 2023 y enero–diciembre de 2024) mediante depuración de datos, evaluación de faltantes y tratamiento de valores atípicos, complementado con herramientas descriptivas y gráficas (resúmenes estadísticos, diagramas de caja, representaciones polares asociadas a condiciones de viento, calendarios del ICA y análisis de correlación entre nodos). Los resultados evidencian una variabilidad diaria significativa y patrones diferenciales entre puntos de medición, así como limitaciones relacionadas con la disponibilidad y el procesamiento de los registros, aspectos que inciden en la interpretación y comparabilidad de las series. En paralelo, se aplicó una encuesta a 64 personas mayores de edad para caracterizar la percepción local sobre la calidad del aire y reconocer elementos de gobernanza (información, participación, articulación y confianza institucional), encontrando alta relevancia atribuida al tema, una valoración predominantemente favorable o aceptable y la identificación del parque automotor como fuente principal percibida. Con base en estos insumos, se formularon estrategias de gobernanza apoyadas en una matriz DOFA, orientadas a fortalecer la comunicación socioambiental, la articulación interinstitucional y la participación ciudadana, de modo que la red no solo genere datos, sino que contribuya efectivamente a la gestión pública local del recurso aire.

Palabras clave: $PM_{2.5}$, calidad del aire, material particulado, monitoreo ciudadano, sensores de bajo costo, gobernanza ambiental, gobernanza de la calidad del aire, participación ciudadana.

DEDICATORIA

A mi mamá, mi motor y mi mayor ejemplo. Gracias por sostenerme en los días difíciles, por creer en mí cuando yo dudaba y por enseñarme que la constancia y presencia también es una forma de amor. Este logro es tan tuyo como mío.

A mi abuela, que siempre nos imaginó llegando lejos. La memoria podrá desdibujar los días, pero no borra el amor con el que nos formó.

A quien, en su momento, fue mi mayor apoyo y una fuente constante de aprendizaje. Gracias por acompañarme en este proceso y por las lecciones que transformaron mi manera de ver la vida. Con cariño y gratitud.

A mis amigos, por su compañía y apoyo incondicional durante estos últimos años. Gracias por estar presentes en los momentos difíciles, por celebrar mis avances y por recordarme que no se camina solo.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco de manera especial a mi director, Juan Pablo Silva Vinasco, por su orientación académica, su disponibilidad y sus valiosas observaciones, las cuales fortalecieron el rigor y la coherencia de este trabajo. De igual forma, expreso mi gratitud a mi codirector, Hiran Jeison Flórez Pinzón, por su acompañamiento constante, sus aportes técnicos y sus recomendaciones oportunas durante el desarrollo del proyecto. Su apoyo y compromiso fueron fundamentales para la culminación exitosa de esta investigación.

Agradezco al Comité Ambiental de la Comuna 22 por su colaboración, disposición y apertura durante el desarrollo de este trabajo. Su acompañamiento, así como la información y el apoyo brindados, fueron fundamentales para comprender el contexto territorial y fortalecer los resultados de la investigación.

Agradezco a los habitantes de la Comuna 22 por su participación y colaboración durante el desarrollo de este trabajo, especialmente por el tiempo y la disposición para compartir sus percepciones y experiencias. Sus aportes fueron esenciales para la construcción de los análisis y para comprender, desde la perspectiva comunitaria, los retos y oportunidades asociados a la calidad del aire en el territorio.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	10
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	11
2. JUSTIFICACIÓN	16
3. OBJETIVOS	17
3.1 Objetivo General	17
3.2 Objetivos Específicos.....	17
4. MARCO TEÓRICO.....	17
4.1 Legislación calidad del aire	17
4.2 Contaminación Atmosférica	19
4.3 Material particulado	20
4.4 Monitoreo de la Calidad del Aire.....	22
4.5 Sensores Remoto.....	22
4.6 Sistemas de Vigilancia de Calidad del Aire.....	24
4.7 Gobernanza de la Calidad del Aire	24
5. METODOLOGÍA.....	25
5.1 Área y Población de Estudio.....	25
5.1.1 Área de Estudio.....	25
5.1.2 Población de Estudio.....	26
5.2 Diagnóstico de la Red Ciudadana	27
5.3 Análisis de datos	30
5.4 Percepción de la calidad del aire e identificación de elementos de gobernanza.....	33
5.5 Formulación de las estrategias de gobernanza.....	34
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	34
6.1 Diagnóstico de las concentraciones de material particulado PM ₁₀ y PM _{2.5} en el área de estudio.....	34
6.1.1 Análisis descriptivo de los datos.....	34
6.1.2 Comportamiento de la concentración media diaria de PM _{2.5} en el periodo de febrero a junio del 2023 y enero a diciembre del 2024.	38
6.1.3 Media de la rosa de los vientos para el periodo febrero a diciembre del 2023.....	46
6.1.4 Rosa de los vientos mensual para el periodo de febrero a diciembre del 2023. ...	48
6.1.5 Concentración media de PM _{2.5} para el periodo de febrero a diciembre del 2023.	49

6.1.6	Concentración media mensual de PM _{2.5} para el periodo de febrero a diciembre del 2023.	50
6.1.7	Calendario con el Índice de Calidad del Aire (ICA) para el periodo de febrero a diciembre del 2023.....	52
6.1.8	Correlación entre nodos para PM _{2.5}	54
6.2	Percepción de la calidad del aire por parte de los ciudadanos que transitan y habitan la zona de influencia del Observatorio Ambiental de la Comuna 22 del Distrito de Santiago de Cali.	56
6.2.1	Perfil de los encuestados	56
6.2.2	Percepción de la calidad del aire.....	58
6.2.3	Identificación de los elementos de gobernanza	69
6.3	Estrategias de gobernanza de calidad del aire aplicables a la red ciudadana del Observatorio Ambiental de la Comuna 22 de Santiago de Cali.	70
6.3.1	Matriz DOFA	70
6.3.2	Análisis de las estrategias	71
7.	CONCLUSIONES	76
8.	RECOMENDACIONES.....	77
	ANEXOS	83

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Comparación del tamaño de las partículas de PM.	21
Figura 2.	Estación de monitoreo de la OAC22.....	23
Figura 3.	Diagrama de gobernanza.	25
Figura 4.	Mapa de comunas del Distrito de Santiago de Cali.....	26
Figura 5.	Pirámide poblacional de la comuna 22 proyección año 2015.....	27
Figura 6.	Distribución espacial de nodos del OAC22.	28
Figura 7.	Sensor Datasheet SEN5x.....	30
Figura 8.	Parámetros del sensor Datasheet SEN5x.....	30
Figura 9.	Concentraciones de PM ₁₀ y PM _{2.5} durante el periodo de febrero a diciembre del 2023 en el nodo 1 (Parque Ambiental Corazón de Pance).	35
Figura 10.	Concentraciones de PM ₁₀ y PM _{2.5} durante el periodo de enero a diciembre del 2024 en el nodo 1 (Parque Ambiental Corazón de Pance).	37

Figura 11. Concentración media diaria de PM _{2.5} para el período de febrero a diciembre del 2023 en el nodo 8 (Universidad Libre).	38
Figura 12. Concentración media diaria de PM _{2.5} para el período de enero a diciembre del 2024 en el nodo 8 (Universidad Libre).	39
Figura 13. Variación temporal de PM _{2.5} en el nodo 5 (Universidad Autónoma de Occidente) para el período de febrero a diciembre del 2023 y el período de enero a diciembre del 2024.	41
Figura 14. Comportamiento del número de automóviles por hora.	43
Figura 15. Distribución de cámaras de foto detección.	44
Figura 16. Distribución de la concentración media de PM _{2.5} por nodo para el período de febrero a diciembre del 2023.	44
Figura 17. Distribución de la concentración media de PM _{2.5} por nodo para el período de enero a diciembre del 2024.	46
Figura 18. Media de la rosa de los vientos para el periodo febrero a diciembre del 2023.	47
Figura 19. Relación entre la concentración de PM y la velocidad del viento.	48
Figura 20. Rosa de los vientos mensual para el período de febrero a diciembre del 2023.	49
Figura 21. Concentración media de PM _{2.5} para el período de febrero a diciembre del 2023 en el nodo 7 (Fundación Universitaria San Martín).	50
Figura 22. Concentración media mensual de PM _{2.5} para el período de febrero a diciembre del 2023 en el nodo 7 (Fundación Universitaria San Martín).	51
Fuente: Elaboración propia.	51
Figura 23. ICA diario para el período de febrero a diciembre del 2023 en el nodo 8 (Universidad Libre).	52
Figura 24. ICA diario para el período de enero a diciembre del 2024 en el nodo 8 (Universidad Libre).	54
Figura 25. Correlación entre todos los nodos para PM _{2.5} .	55
Figura 26. Problemática ambiental más importante percibida.	58
Figura 27. Nivel de importancia de la calidad del aire.	59
Figura 28. Calificación de la calidad del aire.	60
Figura 29. Medios de comunicación usados para consultar información.	60
Figura 30. Principal fuente de contaminación de la calidad del aire.	61
Figura 31. Creencia en la afectación de la salud por el estado de la calidad del aire.	62
Figura 32. Afecciones a la salud debido a la mala calidad del aire.	63
Figura 33. Conocimiento del comité ambiental de la comuna 22.	63

Figura 34. Conocimiento de la existencia del observatorio ambiental de la comuna 22.....	64
Figura 35. Importancia de la participación en actividades para el mejoramiento de la calidad del aire.....	65
Figura 36. Disposición para participar en acciones que mejoren la calidad del aire.	66
Figura 37. Elementos necesarios para participar en las acciones.	66
Figura 38. Interés para participar en las actividades promovidas por el OAC22.	67

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Legislaciones en materia de calidad del aire en Colombia.	17
Tabla 2. Contaminantes primarios.	19
Tabla 3. Contaminantes secundarios.....	20
Tabla 4. Ubicación de Nodos OAC22.	28
Tabla 5. Porcentaje de datos faltantes.	36
Tabla 6. Perfil personas encuestadas.....	57
Tabla 7. Rango de edad de los encuestados.	57
Tabla 8. Matriz DOFA aplicada a la red ciudadana Observatorio Ambiental de la Comuna 22.	70

INTRODUCCIÓN

La contaminación del aire se refiere a la presencia en la atmósfera de sustancias, materias o formas de energía que pueden provocar molestia grave, riesgo o daño en la atmósfera desencadenando efectos adversos en la salud humana, animal y vegetal (Science of South Africa et al., 2019). Entre los principales compuestos contaminantes presentes en la atmósfera se encuentran el material particulado (PM), óxidos de azufre (SO_x), óxidos de nitrógeno (NO_x), ozono troposférico (O₃), monóxido de carbono (CO), entre otros (Hernández, 2020). Estos contaminantes provienen de distintas fuentes como vehículos e industrias y la presencia de estos elementos en áreas urbanas afecta la salud de la población, generando problemas respiratorios y cardiovasculares.

La contaminación del aire produce cerca de 7 millones de muertes al año en el mundo, de modo que la disponibilidad de datos sobre la calidad del aire se hace relevante para evaluar la magnitud, distribución y las tendencias de los efectos de la contaminación (Shairsingh et al., 2023). La obtención de los datos de calidad del aire en los entornos urbanos se hace a través de redes de monitoreo que utilizan diferentes técnicas y equipos para determinar las concentraciones ambientales de los contaminantes. Así, se entiende el monitoreo atmosférico como “un conjunto de acciones que permiten medir los valores de los parámetros meteorológicos y de la calidad del aire en una región determinada” (Salcido et al., 2019). Entonces, el monitoreo atmosférico es una herramienta esencial para evaluar los niveles de contaminación del aire y las condiciones meteorológicas que afectan la dispersión de contaminantes.

Por otro lado, el monitoreo y la disponibilidad de datos no son suficientes para garantizar una gestión eficaz de la calidad del aire. Es indispensable la articulación de los distintos actores sociales, institucionales y comunitarios con el fin de consolidar acciones integradas, acuerdos e iniciativas inclusivas que permitan proteger este recurso. En este contexto, surge el concepto de gobernanza de la calidad del aire, el cual supera el enfoque tradicional centrado exclusivamente en la intervención estatal para salvaguardar la salud pública. Bajo esta nueva perspectiva, la gobernanza promueve una cogestión que fomenta la coordinación multisectorial, la innovación tecnológica y una participación de la ciudadanía (Mahajan et al., 2022).

En la ciudad de Cali, a pesar de que existe una red de monitoreo en la actualidad se presentan algunas limitantes en la cobertura geográfica y espacial de la red que no permiten cubrir toda la ciudad ni su área metropolitana. Como respuesta a lo anterior en la ciudad de Cali han surgido dos redes ciudadanas, la primera hace parte del proyecto Tangara y la segunda es la del Observatorio Ambiental de la Comuna 22. En el caso de la segunda, es una iniciativa del Comité Ambiental de la Comuna 22, el DAGMA y la universidad ICESI, siendo operada con recursos del plan de desarrollo de la ciudad, los cuales son administrados por el DAGMA en coordinación con el comité para su posterior diseño (EMCALI, 2023). Actualmente esta red mide, entre otros parámetros, las concentraciones de material particulado PM₁₀ y PM_{2.5} en procura de proveer información de la

calidad del aire en la zona. Al ser esta una red ciudadana, es importante identificar qué acciones de gobernanza se llevan a cabo en este observatorio, tales como los procesos, mecanismos, organizaciones, la apropiación de los ciudadanos de la información, interacción de los diferentes actores involucrados, el nivel de la toma de decisiones y las acciones que ayudarían a mejorar la gestión de la calidad del aire en la zona.

Basándose en lo mencionado anteriormente, el presente trabajo de grado pretende evaluar la red de monitoreo del Observatorio Ambiental de la Comuna 22, para determinar sus características principales, diseño y comportamiento de las concentraciones de material particulado en la zona de estudio. Además, se indagará la percepción de calidad del aire de los habitantes y transeúntes de la zona, en pro de identificar las estrategias de gobernanza que la red ciudadana está ejecutando actualmente y asimismo proponer otras estrategias aplicables a la red y a la comuna 22 de la ciudad de Santiago de Cali.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Debido a las actividades antropogénicas, el ser humano ha incorporado numerosas sustancias a la atmósfera que afectan la calidad del aire y la salud de las personas. Estas sustancias generalmente provienen de las instalaciones de transporte, recreativas, residenciales, educativas e industriales, mientras que en otros casos pueden ser de fuentes naturales (Asghar et al., 2024). Los principales contaminantes del aire son: partículas suspendidas ($PM_{2.5}$ y PM_{10}), óxidos de azufre (SO_x), óxidos de nitrógeno (NO_x), ozono troposférico (O_3) y monóxido de carbono (CO), entre otros (Hernández, 2020).

De los anteriores contaminantes el más crítico por sus impactos a la salud es el material particulado. El material particulado (PM), por sus siglas en inglés, es una mezcla de aerosoles y partículas sólidas suspendidas en el aire, con la característica de ser tan pequeñas que solo se pueden detectar mediante equipos especializados (EPA, 2023a). Entre el PM se distingue el PM_{10} con diámetros de 10 micrómetros o menores y el $PM_{2.5}$ que son partículas finas inhalables con diámetros de 2.5 micrómetros o menos. La dificultad de la presencia de PM en el aire es que genera un importante riesgo para la salud humana, así, según la (OMS, 2022), “la contaminación del aire ambiente (exterior) en las ciudades y zonas rurales de todo el mundo provoca cada año 4,2 millones de muertes prematuras; esta mortalidad se debe a la exposición a materia particulada fina, que causa enfermedades cardiovasculares y respiratorias, así como cánceres”.

Por estas razones, se hace importante el monitoreo, registro y control de las concentraciones de estas partículas suspendidas por medio de sistemas de vigilancia de la calidad del aire. Se entiende por vigilancia de calidad del aire “un conjunto de acciones que permiten medir los valores de los parámetros meteorológicos y de la calidad del aire en una región dada” (Salcido et al., 2019). En este sentido, el monitoreo atmosférico es una herramienta esencial para evaluar los niveles de contaminación del aire y las condiciones meteorológicas que afectan la dispersión de

contaminantes. Sus contribuciones son fundamentales para establecer medidas de control de la contaminación y políticas destinadas a proteger la salud de la población.

Colombia exhibe una larga tradición en el monitoreo de la calidad del aire. En 1967, se instalan los primeros equipos con la función de monitorear la calidad del aire en el territorio nacional; sin embargo, solo hasta 1982 se adopta la primera norma que regula emisiones y concentraciones de contaminantes en la atmósfera, a través del Decreto 02 de este mismo año, que se mantuvo vigente hasta la aparición de la Resolución 601 del 2006 donde se establecen los niveles máximos de inmisión. Finalmente, después de pasar por diversos Decretos y Resoluciones, el Gobierno Nacional profirió una de las herramientas fundamentales en los últimos años, la política de Calidad del Aire y el CONPES 3943 la “Política para el mejoramiento de la calidad del aire” (MinAmbiente, 2018b).

De modo que la normatividad colombiana, en cuanto a calidad del aire y emisiones se refiere, ha sido dispuesta en función de la protección de la salud humana y del ambiente. La Resolución 2254 de 2017 establece la norma de calidad del aire o nivel de inmisión, aquí se dicta que a partir del 2018 en el caso de las PM_{10} el tiempo de exposición anual y diario en $\mu g/m^3$ debe ser de 50 y 75 respectivamente, mientras que para $PM_{2.5}$ el tiempo de exposición anual y diario debe de ser 25 y 37 $\mu g/m^3$ respectivamente (IDEAM, 2021). Uno de los aspectos claves es que las ciudades de Colombia deben establecer sistemas de vigilancia de calidad del aire para garantizar una continua evaluación, monitoreo y control de estas sustancias.

Durante el 2023, Colombia contó con 23 sistemas de Vigilancia de Calidad del Aire, con un total de 209 estaciones de monitoreo, donde 192 monitorean de forma permanente y 17 operan como estaciones indicativas. La información generada por estos sistemas, una vez validada por las autoridades ambientales competentes, es reportada al Subsistema de Información sobre la Calidad del Aire (SISAIRE), administrado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM, que consolida y pone a disposición estos datos a nivel nacional (IDEAM, 2024).

El Valle del Cauca cuenta con dos Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire – SVCA, donde uno pertenece a la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca- CVC y el otro al Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente de Cali- DAGMA. El SVCA de la CVC empezó su operación en el año 1981 a través de la red de calidad del aire (REDPANAIRE), ya que para este año se contaban con 25 estaciones dispuestas en los principales centros urbanos del país midiendo partículas en suspensión y dióxido de azufre (Cali, 2012). Por otro lado, el SVCA de la ciudad de Cali pasó a ser administrado por el DAGMA en el 2010. En total el SVCA del Valle del Cauca cuenta con 22 estaciones fijas para el monitoreo de la calidad del aire en la región (IDEAM, 2019).

El Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire de Cali – SVCAC que opera en la zona de influencia de la ciudad de Cali cuenta con 9 estaciones de monitoreo fijas; La Flora, ERA-Obrero, Transitoria EDB-Navarro, Base Aérea, Pance, Univalle, Compartir, La Ermita y Cañaveralejo en las cuales se revisa permanentemente el estado de los contaminantes criterio, sin embargo, este sistema cuenta con algunas deficiencias en su operación y mantenimiento que no permiten obtener datos en algunos periodos de tiempo.

Esta falencia es soportada a través del informe de la calidad del aire para el año 2023 elaborado por el (IDEAM, 2024), en el cual se ha depositado la consolidación de las estadísticas correspondientes a los promedios anuales de las concentraciones obtenidos a partir de los SVCA operados por las autoridades ambientales a nivel nacional. En el caso del PM_{10} durante el año 2023 del total de estaciones que monitorean este contaminante, tan solo el 47,4% obtuvieron una representatividad temporal adecuada, mostrando una reducción del 19% en comparación con el 2022, en el caso del $PM_{2.5}$ en 2023 se registraron 83 estaciones con representatividad temporal adecuada, implicando una reducción del 1% en comparación con el 2022.

Dado que el SVCA instalado en la ciudad de Cali presenta algunas dificultades para registrar datos continuamente, es posible que algunas estaciones estén superando el límite permisible y, además, que las estaciones no cubren el total de la zona de influencia de la ciudad, han surgido colectivos ciudadanos organizados, dotados con microsensors de material particulado que están promoviendo la obtención de información de la calidad del aire en Santiago de Cali, permitiendo monitorear material particulado en distintos puntos de la ciudad, no solo donde hace presencia estaciones del SVCA sino también llegando a lugares con escasa cobertura. Estas redes ciudadanas han empezado a articularse con el SVCA de la ciudad para evaluar el desempeño de los microsensors y así brindar trazabilidad y confiabilidad a la ciudadanía y por supuesto a las instituciones gubernamentales (DAGMA, 2023).

Las redes o colectivos ciudadanos en Santiago de Cali han surgido como un ejemplo de gobernanza ambiental comunitaria y como una herramienta de apoyo para el SVCA de la ciudad. Los ciudadanos son quienes, de manera independiente con la ayuda de microsensors instalados en sus hogares, monitorean la calidad del aire permitiendo una articulación con el Sistema de Vigilancia y arrojando datos confiables, este reconocimiento es propio de la entidad encargada de la vigilancia de la calidad del aire.

Los sensores permiten detectar eventos puntuales a escala local, esto quiere decir que pueden medir la concentración de material particulado PM_{10} y $PM_{2.5}$ a nivel de calles, cuerdas y barrios, al ser estos equipos pequeños, posibilitan de manera fácil la instalación en los hogares, negocios e instituciones. Esto se puede ver reflejado en el caso del Observatorio Ambiental de la Comuna 22 de Santiago de Cali. De modo que, estas redes emergentes permiten complementar las mediciones y datos que se toman por medio de la red de estaciones de la autoridad ambiental local que no

cubre en su totalidad el perímetro urbano, dejando algunos sectores sin monitoreo y por ende desconociendo qué está pasando a microescala en estos sectores, además dejando una brecha importante en la información que transmite hacia la ciudadanía con la calidad del aire que está respirando.

Así, el Observatorio Ambiental de la Comuna 22 de Santiago de Cali es otra alternativa que ha surgido como red ciudadana de monitoreo de calidad del aire. La red empezó su funcionamiento en el año 2023, más exactamente para el mes de febrero, actualmente están en funcionamiento 18 estaciones de monitoreo distribuidas a lo largo y ancho de la comuna, de las cuales 7 se sitúan cerca de los límites de la comuna con el fin de obtener datos de posiciones cercanas hacia el sur de la ciudad, apostándole a las mediciones de material particulado con el propósito de que los ciudadanos puedan acceder libremente a la información en tiempo real, permitiendo buscar una relación entre las actividades y comportamientos de las instituciones públicas, empresas y habitantes de la comuna con las concentraciones de material particulado, buscando así soluciones a los problemas ambientales y, a su vez, protegiendo la salud de la población. Esta red surgió también debido al crecimiento exponencial que se viene presentando en el sur de la ciudad desde hace unos 15 años, donde no solo se pueden apreciar construcciones de viviendas y edificios, sino también construcciones industriales, lo que ha originado a su vez mayor desplazamiento de automotores.

Sin embargo, esta red no ha realizado una evaluación de los datos que ha estado registrando desde inicios del año 2023 y a pesar de que cuenta con un portal web donde se pueden consultar los indicadores de calidad del aire y dispone de gráficas con información detallada, persiste una limitante en la manera como estos datos son transmitidos a la población. La información se presenta con un lenguaje técnico que en la mayoría de los casos resulta poco comprensible para los ciudadanos, lo que dificulta la apropiación del tema y la toma de decisiones informadas. Por ello, resulta pertinente revisar y fortalecer las estrategias de comunicación para garantizar que la información generada por la red sea accesible y clara para toda la comunidad. A esto se suma que gran parte de la población no utiliza dicho portal como fuente de consulta, y la red ciudadana tampoco ha diversificado sus estrategias de divulgación hacia medios más accesibles, como redes sociales, campañas pedagógicas o espacios comunitarios. Esta situación refleja un reto de gobernanza de la calidad del aire, ya que no basta con generar información técnica, sino que es necesario garantizar su socialización, interpretación y uso efectivo por parte de los diferentes actores sociales para fortalecer la participación ciudadana y la gestión ambiental.

Adicionalmente, la gobernanza del aire juega un papel fundamental al componerse de procesos, mecanismos y organizaciones con los que diversos sectores de la sociedad pueden difundir la información ocupando un rol importante para promover la participación de la ciudadanía en la gestión de la calidad del aire. Se hace esencial asegurar que toda la información esté disponible para los ciudadanos, sea interactiva y de fácil interpretación para articular la participación y

colaboración de diversos actores a través de herramientas informáticas fomentando la gestión y el desarrollo de una ciudad más amigable con la calidad del aire. Sin embargo, es importante señalar que la Comuna 22 destinó una parte de sus recursos para apoyar el Observatorio Ambiental. No obstante, la administración de estos recursos corresponde actualmente al DAGMA, entidad que, hasta la fecha, no ha estructurado formalmente la organización ni los presupuestos específicos requeridos para asegurar el funcionamiento efectivo del Observatorio y, en consecuencia, garantizar la generación, gestión y promoción del uso de los datos e información producidos en línea por sus 18 estaciones.

Por lo tanto, es importante evaluar a través de la red ciudadana y la información que brinda, ¿cuál es el comportamiento de las concentraciones de material particulado PM_{10} y $PM_{2.5}$ en la Comuna 22 de Santiago de Cali y cómo la ciencia ciudadana con esta información y por medio de la gobernanza está influyendo en la toma de decisiones gubernamentales y comunitarias referentes a los impactos ambientales que estos contaminantes estén generando en la zona?

2. JUSTIFICACIÓN

Las redes ciudadanas surgen como una alternativa para fomentar la participación de la comunidad en la monitorización e interpretación de los datos de la calidad del aire, que, gracias a los sensores de bajo costo y tecnologías de última generación, permite recopilar información en tiempo real de diferentes ubicaciones como parques, escuelas, calles transitadas y áreas industriales. En algunos casos estos datos suelen ser compartidos e integrados con los datos oficiales publicados por las autoridades gubernamentales responsables del estado del aire, permitiendo así, un panorama completo del estado de la calidad del aire en estas zonas e informando a la comunidad y autoridades sobre eventos locales que puedan estar afectando la calidad del aire y por tanto la salud humana. Por otro lado, las redes llevan a cabo campañas de sensibilización a la comunidad por medio de educación ambiental abordando problemas específicos, como reducir emisiones, implementar zonas verdes o promover el transporte sostenible para que comprendan los factores que contribuyen a la contaminación del aire, cómo esto afecta la salud humana y se puedan tomar medidas para mejorar su entorno ambiental.

Teniendo en cuenta lo dicho anteriormente los aportes que realizará el presente trabajo de grado son:

- **En lo social:** proveerá información a los habitantes de la comuna 22 de Santiago de Cali y, en general, a los ciudadanos, funcionarios del estado y otras personas interesadas en esta investigación para que conozcan el estado de la calidad del aire en esta zona, comprendiendo que todos los seres humanos tenemos derecho a un ambiente sano y a conocer la calidad del aire que se respira.
- **En lo ambiental:** conocer el nivel de exposición a material particulado permitirá entender si las estrategias de gobernanza del aire realmente están contribuyendo a proteger la salud de las personas y disminuir los niveles de contaminación ambiental.
- **En lo institucional:** se pretende complementar y fortalecer los informes de calidad del aire por parte de las autoridades ambientales para instaurar mecanismos de participación ciudadana para los habitantes de la zona y demás actores involucrados.
- **En lo académico:** la participación ciudadana ayudará a comprender que partiendo de la percepción habitual del medio, en este caso el aire, se pueden desarrollar herramientas que permitan a los ciudadanos apropiarse de su entorno protegiendo la salud humana.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo General

Evaluar la Red Ciudadana perteneciente al Observatorio Ambiental de la Comuna 22 de Santiago de Cali en sus aspectos de monitoreo y gobernanza de la calidad del aire.

3.2 Objetivos Específicos

1. Realizar un diagnóstico del comportamiento de las concentraciones de material particulado PM₁₀ y PM_{2.5} registradas por la red ciudadana del Observatorio Ambiental de la Comuna 22 de Santiago de Cali.
2. Establecer la percepción de la calidad del aire por parte de los ciudadanos que transitan y habitan la zona de influencia del Observatorio Ambiental de la Comuna 22 de Santiago de Cali para identificar elementos de gobernanza de la calidad del aire.
3. Formular estrategias de gobernanza de calidad del aire que sean aplicables a la red ciudadana del Observatorio Ambiental de la Comuna 22 de Santiago de Cali.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 Legislación calidad del aire

Colombia al igual que otros países en vía de desarrollo, ha instalado una política ambiental eficaz que permita unas condiciones óptimas para un buen entorno social (Cali, 2012). En la **Tabla 1** se resume en orden cronológico los principales cambios, modificaciones y creaciones de leyes, decretos o resoluciones que han permitido instaurar esta política de manera progresiva.

Tabla 1. Legislaciones en materia de calidad del aire en Colombia.

Ley / Decreto / Resolución	Año	Objetivo Principal
Ley 23	1973	Prevenir y controlar la contaminación del medio ambiente y buscar el mejoramiento, conservación y restauración de los recursos naturales renovables, para defender la salud y el bienestar de todos los habitantes del Territorio Nacional (Colombia, 2023)
Decreto 2811	1974	Lograr la preservación y restauración del ambiente y la conservación, mejoramiento y utilización racional de los recursos naturales renovables, según criterios de equidad que aseguran el desarrollo armónico del hombre y de dichos recursos, la disponibilidad permanente de éstos, y la máxima participación social para beneficio de la salud y el bienestar de los presentes y futuros habitantes del territorio Nacional
Ley 9	1979	Los procedimientos y las medidas que se deben adoptar para la regulación, legalización y control de los descargos de residuos y

		materiales que afectan o pueden afectar las condiciones sanitarias del Ambiente. (Código sanitario nacional).
Decreto 02	1982	Su objetivo principal fue reglamentar parcialmente el Título 1 de la ley 09 de 1979 y el Decreto Ley 2811 de 1974, en cuanto a emisiones atmosféricas. (Normas de regulación de emisiones).
Ley 99	1993	Se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones. (Derechos y obligaciones sobre el medio ambiente).
Decreto 948	1995	Por el cual se reglamentan, parcialmente varias leyes y artículos en relación con la prevención y control de la contaminación atmosférica y la protección de la calidad del aire. (Reglamento de protección y control de la calidad del aire).
Decreto 2107	1995	Por medio del cual se modifica parcialmente el Decreto 948 de 1995 que contiene el Reglamento de Protección y Control de la Calidad del Aire.
Resolución 909	1996	Por la cual se modifica parcialmente la Resolución 005 de 1996 que reglamenta los niveles permisibles de emisión de contaminantes producidos por fuentes móviles terrestres a gasolina o diésel, y se definen los equipos y procedimientos de medición de dichas emisiones.
Resolución 619	1997	Por la cual se establecen parcialmente los factores a partir de los cuales se requiere permiso de emisión atmosférica para fuentes fijas.
Resolución 601	2006	Por la cual se establece la Norma de Calidad del Aire o Nivel de Inmisión, para todo el territorio nacional en condiciones de referencia.
CONPES 3550	2008	Su objetivo fue dar los lineamientos para la formulación de la Política Integral en Salud Ambiental (PISA) con el fin último de contribuir bajo un enfoque integral al mejoramiento de la calidad de vida y el bienestar de la población colombiana, con un plan de acción que tienen como propósito fortalecer la gestión integral para la prevención, manejo y control de diferentes factores ambientales que tienen el potencial de originar efectos adversos en la salud humana, enfatizando especialmente en los componentes de calidad del aire en exteriores e interiores, calidad de agua y seguridad química.
Resolución 610	2010	Su objetivo principal fue dictar la política de calidad del aire.
Resolución 2254	2017	Se adopta la norma de calidad del aire ambiente.
CONPES 3943	2018	Política para el mejoramiento de la calidad del aire.

Fuente: Elaboración propia.

4.2 Contaminación Atmosférica

La Contaminación Atmosférica es el fenómeno de acumulación o de concentración de contaminantes -entendidos estos como fenómenos físicos, sustancias o elementos en estado sólido, líquido o gaseoso-, causantes de efectos adversos en el medio ambiente, los recursos naturales renovables y la salud humana, que solos, en combinación, o como productos de reacción, se emiten al aire como resultado de actividades humanas, de causas naturales, o de una combinación de estas (MinAmbiente, 2015). La contaminación del aire representa una de las mayores amenazas globales para la salud. En los últimos años, se ha transformado en un problema ambiental de gran importancia (Pota et al., 2025). Los contaminantes del aire se dividen en dos:

- **Contaminantes Primarios:** Son todos los contaminantes emitidos por una fuente de emisión hacia la atmósfera, como por ejemplo el monóxido de carbono (CO).
- **Contaminantes Secundarios:** Estos se forman a partir de un conjunto de reacciones químicas en la atmósfera a partir de contaminantes primarios. Un ejemplo es el ozono (O₃) que se forma por reacciones de compuestos orgánicos volátiles (COVs) y óxidos de nitrógeno (NO_x).

La Environmental Protection Agency (EPA) definió con fines regulatorios, una clasificación en **contaminantes criterio** y **contaminantes no criterio** al considerar que los contaminantes eran muy variantes en su presencia, efectos en la salud y variabilidad. Estos contaminantes criterio son aquellos que se encuentran presentes en cualquier lugar y que dada su naturaleza resultan ser un peligro para la salud pública y el medio ambiente (Ubilla & Yohannessen, 2017).

También están definidas las fuentes de emisión de contaminantes como móviles o estacionarias, teniendo en cuenta que el parque automotor es la principal fuente móvil de contaminación del aire, debido a que las emisiones de los vehículos, sin importar el tamaño, se producen cerca a los hogares, trabajos, instituciones, entre otros. Por otro lado, las fuentes estacionarias hacen referencia a las instalaciones fijas, un ejemplo de estas son las industrias que en algunos procesos de manufactura o producción requieren hacer el uso de combustibles o hidrocarburos. Otras fuentes no recurrentes e intermitentes son los incendios forestales y/o la quema de biomasa (Ubilla & Yohannessen, 2017). La Tabla 2 y 3 muestran los contaminantes primarios y secundarios respectivamente con sus principales fuentes de emisión.

Tabla 2. Contaminantes primarios.

CONTAMINANTES PRIMARIOS		
CONTAMINANTE	FUENTES	EFFECTOS
Material Particulado PM₁₀	Incendios forestales, erupciones volcánicas y tormentas de polvo, emisiones de vehículos, procesos industriales, quema de	Afectación en las vías respiratorias causando irritación y afecciones respiratorias.

	biomasa, construcción y actividades de calefacción y cocina, entre otros.	
Material Particulado PM_{2.5}	Incendios forestales, erupciones volcánicas y tormentas de polvo, emisiones de vehículos, procesos industriales, quema de biomasa, construcción y actividades de calefacción y cocina, entre otros.	Afectación hasta los alvéolos causando afecciones cardiovasculares.
Dióxido de azufre (SO₂)	Combustión de combustibles fósiles, volcanes, entre otros.	Causa problemas respiratorios y contribución a la lluvia ácida.
Monóxido de carbono (CO)	Combustión incompleta de combustibles fósiles.	Afecta negativamente la capacidad del cuerpo para transportar oxígeno.
Óxido de nitrógeno (NO_x)	Vehículos motorizados y procesos industriales.	Contribuye a la formación de Smog y causar problemas respiratorios.

Fuente: IDEAM (2022).

Tabla 3. Contaminantes secundarios.

CONTAMINANTES SECUNDARIOS		
CONTAMINANTE	FUENTES	EFFECTOS
Ozono troposférico (O₃)	Reacciones químicas entre los óxidos de nitrógeno (NO _x) y compuestos orgánicos volátiles (COV) en presencia de la luz solar.	Daños a los pulmones y problemas respiratorios.
Dióxido de nitrógeno (NO₂)	Vehículos o actividades industriales, también se genera indirectamente por la oxidación del monóxido de nitrógeno.	Daños en los pulmones y bronquitis aguda o crónica.

Fuente: IDEAM (2022).

4.3 Material particulado

El material particulado existe en muchos tamaños y formas, y puede estar conformado por diferentes compuestos químicos. Algunas se emiten directamente desde una fuente, como obras en construcción, caminos sin asfaltar, campos, chimeneas o incendios. Sin embargo, la mayoría de las partículas se forman en la atmósfera como resultado de reacciones complejas de químicos, como el dióxido de azufre y los óxidos de nitrógeno, que son contaminantes emitidos por centrales eléctricas, industrias y automóviles. Algunas partículas, como el polvo, la suciedad, el hollín, o el humo, son lo suficientemente grandes y oscuras como para verlas a simple vista. Otras son tan

pequeñas que solo pueden detectarse mediante el uso de un microscopio electrónico. Debido a su tamaño pueden llegar a las vías respiratorias generando problemas y afecciones (EPA, 2023a).

El material particulado se clasifica como:

- **PM₁₀**: Son todas las partículas inhalables que tienen un diámetro cerca de 10 micrómetros o menores.
- **PM_{2.5}**: Son todas las partículas inhalables finas que poseen un diámetro de 2.5 micrómetros o menores.

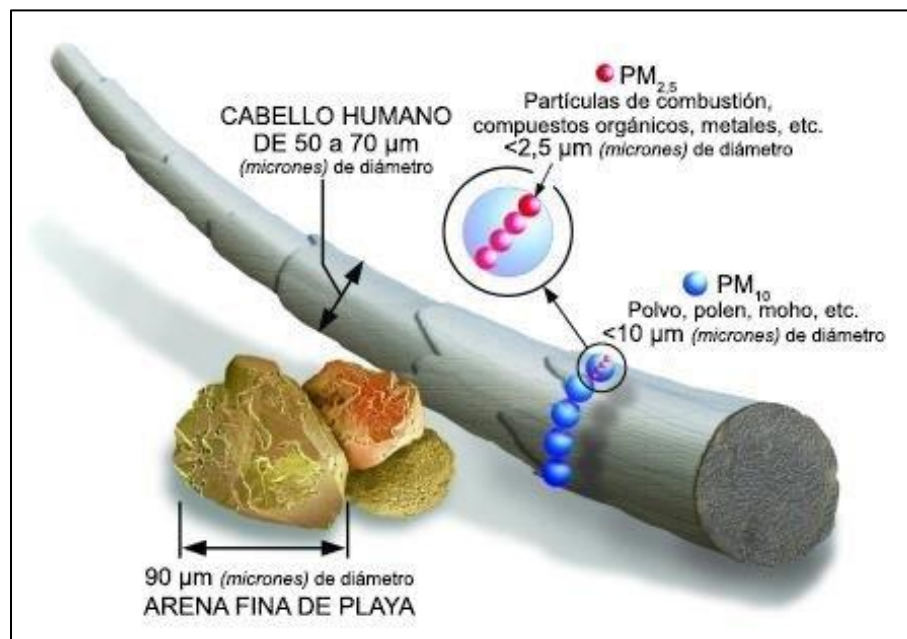


Figura 1. Comparación del tamaño de las partículas de PM.

Fuente: EPA (2023).

El material particulado se deposita en el tracto respiratorio ocasionando inflamación inmunitaria anormal y alterando la función de las células epiteliales (Romaszko-Wojtowicz et al., 2025). Según Lu & Lee (2025), el PM_{2.5} tiene la capacidad de infiltrarse en los alvéolos pulmonares, que son las estructuras encargadas del intercambio de gases en los pulmones, y podría desplazarse hacia otros órganos del cuerpo, investigaciones recientes han demostrado una relación directa entre la exposición al material particulado y el desarrollo de afecciones de salud severas, causando varias anomalías importantes; enfermedades respiratorias (por ejemplo, bronquitis crónica y aguda, y cáncer de pulmón), enfermedades cardiovasculares, COVID-19, problemas en el embarazo y muertes prematuras por cáncer de pulmón. De acuerdo con los datos disponibles, las poblaciones más vulnerables, incluyendo adultos mayores, niños, individuos con afecciones crónicas, mujeres

en estado de embarazo y fetos, tienen una mayor susceptibilidad a sufrir los impactos negativos derivados de la exposición a la contaminación atmosférica (Mohammadi Dashtaki et al., 2025).

4.4 Monitoreo de la Calidad del Aire

El monitoreo de la calidad del aire se fundamenta en la medición de diversos parámetros esenciales para la evaluación de la contaminación atmosférica. Entre ellos se destacan las partículas en suspensión (PM) cuya presencia obedece tanto a procesos naturales como las tormentas de polvo, así como también a las actividades de origen antrópico, tales como las emisiones generadas por el transporte vehicular. Estas partículas presentan variaciones significativas en cuanto a su tamaño y diámetro aerodinámico, lo que determina en gran medida su comportamiento y efectos en el medio ambiente y la salud humana (Elbestar et al., 2024).

Las mediciones obtenidas a través de monitores reglamentarios y de referencia instalados en estaciones fijas se consideran el estándar de referencia, dado que proporcionan registros directos —y no estimaciones— de las concentraciones de contaminantes y de la exposición asociada. Además, cuentan con la ventaja de estar sometidas a rigurosos procesos de control y aseguramiento de la calidad, lo que fortalece su validez y confiabilidad (Khreis et al., 2022).

La medición de concentraciones de material particulado (PM), tanto en ambientes interiores como exteriores, generalmente exige el uso de equipos de alto costo, lo que limita la viabilidad de este tipo de estudios en comunidades con escasos recursos y en contextos de investigación desarrollados en zonas de bajos ingresos. No obstante, los avances recientes en microelectrónica y telecomunicaciones han impulsado el desarrollo de dispositivos de bajo costo que permiten superar en parte estas restricciones económicas y ampliar las posibilidades de monitoreo (Fajardo-Montaña et al., 2025).

4.5 Sensores Remoto

El término “sensores de aire de bajo costo” o “sensores de calidad del aire” hace referencia a un tipo de tecnología que se caracteriza por leer directamente un contaminante en el aire, ser de menor tamaño y estar a la venta en valores que facilitan incrementar los puntos de monitoreo en comparación con algunos años atrás. Este tipo de tecnología se ha expandido en el mercado en años recientes pues varían en su diseño físico, dependiendo del tipo de contaminante que mide, cómo gestiona los datos, si es a prueba de las condiciones climáticas y con qué energía opera (EPA, 2023b).



Figura 2. Estación de monitoreo de la OAC22.

Fuente: OAC22 (2025).

Los sensores de bajo costo ofrecen la posibilidad de realizar mediciones en tiempo real de manera más económica, lo que facilita una ampliación de la cobertura espacial frente a los métodos tradicionales utilizados para medir los contaminantes atmosféricos (European Commission: Joint Research et al., 2019). Estos sensores tienen el potencial de complementar redes o estaciones de control de la calidad del aire. Gracias a su portabilidad y tamaño compacto, actualmente despiertan un gran interés en el ámbito de la investigación, como también en el de la ciencia ciudadana (Schneider et al., 2023).

De acuerdo con la European Commission (2019), el aumento de la accesibilidad comercial de la tecnología de microsensores está impulsando la adopción acelerada de sensores de bajo costo para el control de la calidad del aire, tanto por parte de proyectos de ciencia ciudadana como de organismos públicos. Por lo general, las entidades públicas pretenden incrementar la densidad de las mediciones de seguimiento y, en muchos casos, optan por utilizar sensores de bajo costo debido a la imposibilidad de financiar un número adecuado de Estaciones de Monitorización de la Calidad del Aire (AQMS, por sus siglas en inglés). Por otro lado, el control de la contaminación atmosférica mediante métodos de medición de referencia exige personal cualificado para el mantenimiento y la calibración de los equipos de medición, procesos que se detallan en procedimientos operativos estándar específicos. En cambio, se anticipa que los sensores de bajo costo puedan funcionar sin necesidad de intervención humana, lo que posibilita que usuarios sin

conocimientos técnicos especializados realicen mediciones de la contaminación del aire (European Commission: Joint Research et al., 2019).

4.6 Sistemas de Vigilancia de Calidad del Aire

Es un conjunto de equipos de monitoreo de contaminantes atmosféricos, que se encuentran instalados en un lugar de interés con un propósito determinado. Esta infraestructura debe estar acompañada de todas las actividades necesarias para su correcto funcionamiento, dentro de las cuales se puede mencionar la operación por personal calificado, programas de mantenimiento preventivo y correctivo, un sistema de administración de información que permita una correcta validación de los datos, entre otras (SISAIRE, 2018).

Las redes de monitoreo regulatorio ofrecen una resolución temporal elevada, permitiendo la recolección de datos en intervalos horarios o diarios, sin embargo, su alcance espacial es limitado, lo que puede ocasionar errores considerables en la estimación de la exposición en estudios epidemiológicos (Just et al., 2025). Los gobiernos han utilizado históricamente estaciones de monitoreo fijas para evaluar los niveles de contaminación del aire, si bien son eficaces, estas estaciones tienen restricciones debido a su falta de movilidad y el elevado costo del equipo requerido (Elbestar et al., 2024).

La tecnología del Internet de las Cosas (IoT) ha revolucionado la manera en que se monitorea la contaminación del aire, sustituyendo las estaciones fijas y costosas gestionadas por el gobierno por sistemas portátiles más accesibles. Gracias a los avances en sensores de bajo costo para la detección de contaminantes atmosféricos numerosos investigadores están impulsando el desarrollo de nuevas soluciones para el monitoreo ambiental (Barot & Kapadia, 2020).

4.7 Gobernanza de la Calidad del Aire

La gobernanza del aire se puede definir como el conjunto de procesos, mecanismos y organizaciones a través de los cuales los actores políticos y sociales (gobierno, academia, sociedad civil, sector privado), influyen en las acciones para mejorar la gestión de la calidad del aire (MinAmbiente, 2018a). De acuerdo con Gaona et al. (2025) la gobernanza del aire surge como un modelo de gestión colaborativa, en el que se plantean soluciones integrales para abordar un problema específico. No obstante, dada la complejidad de la contaminación atmosférica, que involucra diversas fuentes y se extiende más allá de los límites políticos, una única entidad territorial local no posee la capacidad para gestionar de manera integral todas las acciones y actores responsables de la contaminación del aire, casos como este se presentan en diversas ciudades del mundo (Quirama-Aguilar et al., 2021).

La Figura 3 muestra un diagrama de gobernanza establecido por el gobierno nacional en la cual la gobernanza proviene de diferentes sectores que, a su vez, tienen unas responsabilidades mínimas, como por ejemplo la academia, que en su rol tiene la tarea de formar capacidades, desarrollar

investigaciones y explorar alternativas que brinden soluciones para mitigar la problemática. El gobierno nacional debe diseñar y socializar políticas, lineamientos y estrategias e impulsar la coordinación de todos los sectores. A la ciudadanía le corresponde adoptar hábitos de consumo sostenibles, apoyar la implementación de acciones que reduzcan las emisiones y participar en la formulación y ejecución de políticas públicas. Por último y no menos importantes, el sector privado debe cumplir con la norma, desarrollando producciones más limpias y servicios más amigables con el medio ambiente para cumplir con lo establecido en la norma, promoviendo la innovación y buenas prácticas ambientales que implementen acciones de responsabilidad social y ambiental (IDEAM, 2022).

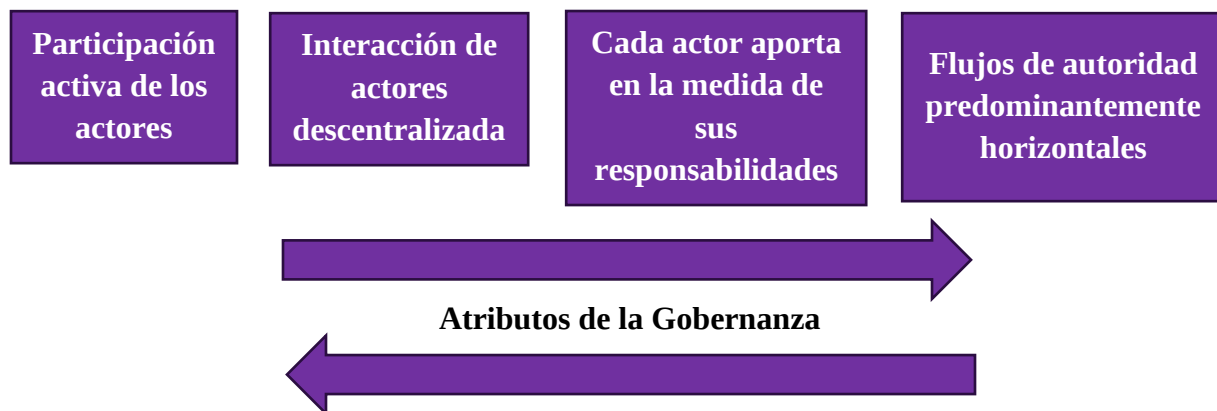


Figura 3. Diagrama de gobernanza.
Fuente: Adaptado de MinAmbiente (2021).

5. METODOLOGÍA

5.1 Área y Población de Estudio

5.1.1 Área de Estudio

Este estudio se concentró en la comuna 22 (Figura 4) que está ubicada hacia el sur del Distrito Especial de Santiago de Cali, posee un área bruta de 1072,1 hectáreas que delimitan en el norte con las comunas 18 y 17, al occidente con los corregimientos de Pance y La Buitrera, al oriente con la actual área de expansión urbana y el corregimiento El Hormiguero, finalmente al sur con el corregimiento de Pance (Cali, 2023). La comuna 22 hace parte del Distrito de Santiago de Cali la ciudad más grande del suroccidente colombiano ubicada al sur del departamento del Valle del Cauca en los paralelos con latitud norte 3°27'26" y longitud oeste 76°31'42" en una altura de 1.070 metros sobre el nivel del mar que contaría con 2.297.230 habitantes proyectados para el año del 2023 (DANE, 2021).

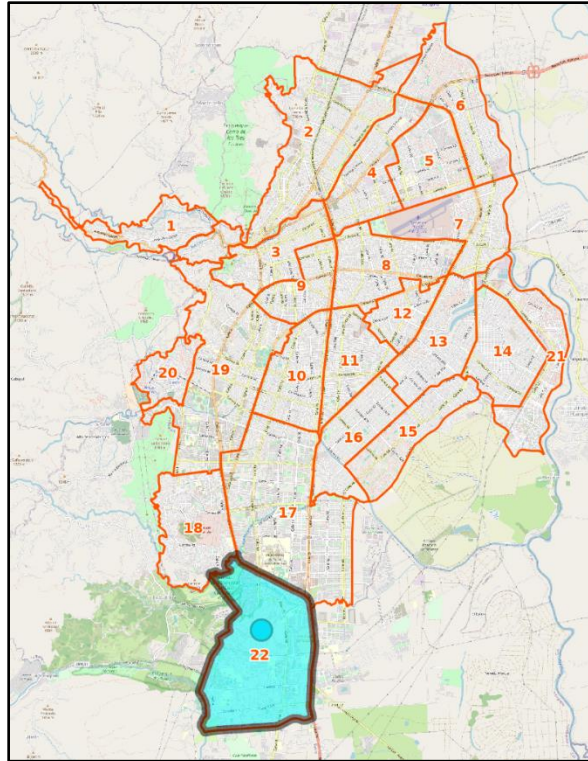


Figura 4. Mapa de comunas del Distrito de Santiago de Cali.

Fuente: IDESC (2023).

La comuna 22 es actualmente la principal zona de crecimiento de la ciudad. Su proximidad a la cordillera occidental le otorga características ambientales destacadas, tanto en términos de su entorno geográfico como de su paisaje y calidad ambiental. En el ámbito educativo, la comuna 22 alberga más de 32 colegios privados, así como 6 universidades dentro de su territorio y tres adicionales en su periferia que influyen en la zona. Esto la convierte en la zona con la mayor concentración de instituciones educativas y de educación superior en la ciudad, consolidándose como un centro educativo y cultural de gran relevancia. En términos ambientales, la comuna 22 se distingue por su riqueza en humedales, entre ellos el Humedal de La Babilla, el Lago Panamericano, y los humedales El Retiro, La María y Cañasgordas. Además, cuenta con nacimientos de agua como el Zanjón del Burro, la Quebrada Gualí y la influencia de los ríos Meléndez y Lili, esta abundancia de recursos hídricos, junto con su diversidad de bosques, flora y fauna le confiere un alto potencial ambiental dentro de la ciudad. Por otro lado, también cuenta con centros recreativos y privados, siendo esta comuna el paso obligatorio para que los ciudadanos puedan visitar el parque de la salud – Río Pance, uno de los principales atractivos turísticos de la ciudad (Melo Muñoz, 2017).

5.1.2 Población de Estudio

La comuna 22 del DSC tiene una estratificación social 6 (estrato moda) donde residen aproximadamente 26,298 personas según la proyección de la Alcaldía de Cali para el 2023, en

donde también se proyectan para este mismo año aproximadamente 15,078 viviendas, esta comuna cuenta con una densidad de 0-27 viviendas por hectárea que se dividen en 1 barrio y 4 urbanizaciones generando así un alto nivel de vida (Cali, 2023).

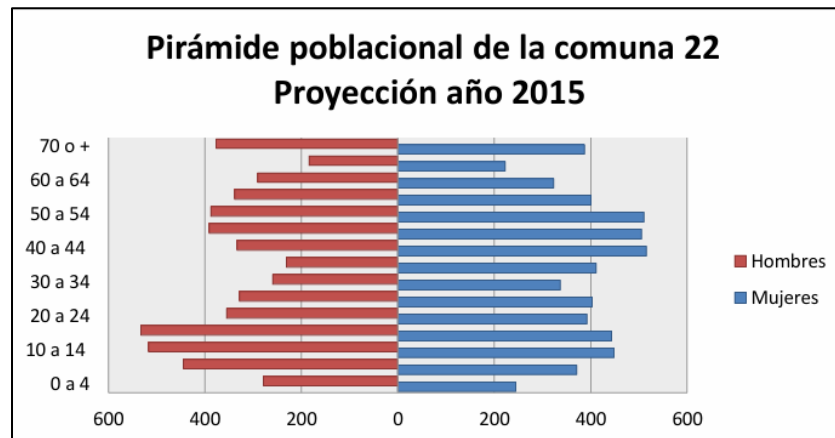


Figura 5. Pirámide poblacional de la comuna 22 proyección año 2015.
Fuente: Muñoz & Castaño (2015).

De acuerdo con la Figura 5, se evidencia que la población en la comuna 22 tiene un alto porcentaje de personas pertenecientes al grupo de la tercera edad, indicando que el índice de natalidad ha descendido rápidamente y, a su vez, que la población de mujeres es mayor que la de hombres, dando una perspectiva de la calidad de personas que habitan la comuna 22 (Muñoz & Castaño, 2015).

5.2 Diagnóstico de la Red Ciudadana

A partir del área anteriormente definida, se consultó cuántas estaciones (Nodos) de medición actualmente poseía el Observatorio, consultando la página web oficial del observatorio en donde se hallaron 18 nodos, los cuales se encuentran distribuidos en la comuna y sus alrededores, para esto se utilizó la herramienta de georreferenciación Google Maps en la cual de manera gráfica se muestra la distribución de los nodos a lo largo y ancho de la comuna 22 como se puede apreciar en la Figura 6, mientras que en la Tabla 4 están depositados los nombres de las instituciones en las cuales se encuentran instaladas las estaciones de medición, las cuales cuentan con el microsensor de material particulado, esta información se consultó vía internet en la página oficial de la OAC22.

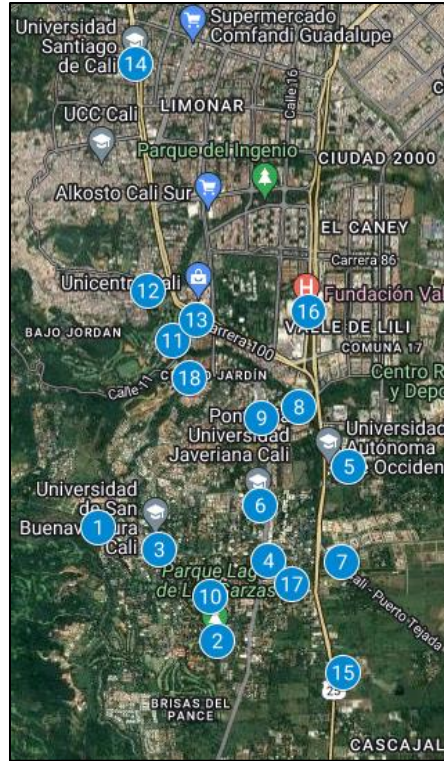


Figura 6. Distribución espacial de nodos del OAC22.

Fuente: OAC22 (2025).

Tabla 4. Ubicación de Nodos OAC22.

NODO	LATITUD NORTE	LONGITUD OESTE	INSTITUCIÓN	DIRECCIÓN
1	3°20'43.2"	76°33'07.2"	Parque Ambiental Corazón de Pance	Av. Los Cerros Vía La Vorágine
2	3°19'56.4"	76°32'13.1"	Ecoparque Lago de Las Garzas	Carrera 127 Con Calle 16 Barrio Pance
3	3°20'41.1"	76°32'38.4"	Universidad San Buenaventura	Carrera 109 #22-00
4	3°20'32.1"	76°31'47.4"	Universidad ICESI	Calle 18 #122-135
5	3°21'13.9"	76°31'21.9"	Universidad Autónoma de Occidente	Calle 25 #115-85 Km 2 Vía Cali - Puerto Tejada
6	3°20'56.3"	76°31'53.3"	Pontificia Universidad Javeriana	Calle 18 #118-250
7	3°20'35.2"	76°31'17.9"	Fundación Universitaria San Martín	Carrera 122 #23-395 Vía Cali - Puerto Tejada

8	3°21'39.7"	76°31'35.6"	Universidad Libre – Campus Valle del Lili	Carrera 109 #22-00
9	3°21'34.2"	76°31'53.6"	Colegio Bilingüe Bennett	Avenida Cascajal Calle Alfárez Real Barrio Ciudad Jardín
10	3°20'17.1"	76°32'19.8"	Colegio Nuevo Cambridge	Carrera 125 #12-20 Barrio Pance
11	3°22'08.2"	76°32'45.4"	Club Campestre de Cali	Calle 5 Carrera 100
12	3°22'31.3"	76°32'43.4"	Fundación UNICATÓLICA – Sede Meléndez	Carrera 94 #4C-04 Barrio Meléndez
13	3°22'20.0"	76°32'21.1"	Holguines Trade Center	Carrera 100 #11-60 Barrio Ciudad Jardín
14	3°24'14.5"	76°32'55.0"	Universidad Santiago de Cali	Calle 5 #62-00
15	3°19'36.5"	76°31'19.4"	ZONAMERICA	Calle 36 entre Carreras 134 y 129
16	3°22'22.1"	76°31'33.2"	Fundación Valle del Lili	Carrera 98 #18-49
17	3°20'20.8"	76°31'40.1"	Colegio Nuestra Señora del Rosario	Carrera 125 #22-17
18	3°21'46.9"	76°32'28.4"	Conjunto Residencial Bagatelle	Carrera 105 #11-56

Fuente: Observatorio Ambiental de la Comuna 22 de Cali (2025).

La red usa sensores de calidad del aire marca Sensirion (SEN50-SDN-T) en los 18 nodos como se puede apreciar en la Figura 7, este sensor realiza la medición de parámetros críticos de calidad del aire; PM, COV, NOx, humedad y temperatura, el algoritmo del sensor permite la integración con aplicaciones de climatización y calidad del aire, siendo una tecnología que ahorra recursos y tiempo centrada en las competencias básicas, proporcionando salidas totalmente calibradas con una interfaz digital. Por otro lado, las especificaciones se pueden observar en la Figura 8.



Figura 7. Sensor Datasheet SEN5x.

Fuente: SENSIRION (2022).

Parameter	Conditions		Value	Units
Mass concentration specified range	-		0 to 1'000	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
Mass concentration size range	PM1.0		0.3 to 1.0	μm
	PM2.5		0.3 to 2.5	μm
	PM4		0.3 to 4.0	μm
	PM10		0.3 to 10.0	μm
Mass concentration precision ^{2,3} for PM1 and PM2.5 ⁴	0 to 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$		$\pm 5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ AND 5 % m.v.	
	100 to 1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$		± 10	% m.v.
Mass concentration precision ^{2,3} for PM4, PM10 ⁵	0 to 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$		± 25	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
	100 to 1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$		± 25	% m.v.
Maximum long-term mass concentration precision limit drift	0 to 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$		± 1.25	$\mu\text{g}/\text{m}^3$ / year
	100 to 1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$		± 1.25	% m.v. / year
Typical start-up time ⁶	number concentration	200 – 3000 $\#/\text{cm}^3$	8	s
		100 – 200 $\#/\text{cm}^3$	16	s
		50 – 100 $\#/\text{cm}^3$	30	s
Sensor output characteristics	PM2.5 mass concentration		Calibrated to TSI DustTrak™ DRX 8533 Ambient Mode	
Additional T-dependent mass precision limit drift ³	temperature difference to 25°C	typ.	± 0.5	% m.v. / °C
Laser wavelength (DIN EN 60825-1 Class 1)			typ.	660 nm

Figura 8. Parámetros del sensor Datasheet SEN5x.

Fuente: SENSIRION (2022).

5.3 Análisis de datos

Los datos recolectados por la OAC22 son almacenados en la página oficial de la red, allí se adoptó la temporalidad de la medición entre los meses de febrero a diciembre del año 2023, así como también los datos de todo el año del 2024. Se descargaron los archivos en libros de Excel (.xlsx) con las mediciones de material particulado PM_{2.5} y PM₁₀ para dicha temporalidad. Al realizarse mediciones cada 15 minutos de material particulado se toma una cantidad importante de datos, para lo cual se necesitó descargar los archivos cada 15 días. Posteriormente se organizaron los datos, en donde cada archivo o libro de Excel contenía todos los meses para el periodo de febrero a diciembre para cada nodo y en el caso del 2024 los libros en Excel contenían todos los meses desde enero a diciembre para cada nodo, de esta manera se realizó la importación como dataframes en el software de computación estadística RStudio. El procesamiento y análisis de los datos se utilizó en su mayoría con la librería Openair. Sin embargo, en algunos casos se utilizó también dplyr y ggplot2 para poder desarrollar y crear las visualizaciones gráficas.

La primera corrección para los datos de concentración de material particulado se realizó cambiando el formato de fecha y hora, los cuales estaban establecidos exactamente cada 15 minutos, este paso permitió que los archivos que se descargaron directamente de la página web y que tenían en el formato establecido la fecha y hora como también los segundos, que variaban indiscriminadamente, dejaran de generar problemas al momento de ingresarlos al software RStudio. También se presentaban datos faltantes en uno o varios de los 4 datos que se debían generar por hora y, además, en algunos casos faltaban horas o hasta días enteros, es por esta razón que se trasladaron las mediciones de las concentraciones a otro formato que permitiera dejar vacío o sin valor los datos que hacían falta.

Una vez terminado cada libro de Excel para cada nodo con su periodo correspondiente de febrero a diciembre del 2023 y enero a diciembre del 2024, siguiendo la metodología de validación de datos, estos fueron ingresados al software de RStudio con el cual, a través de la librería y su código de programación, se logró eliminar las horas que no cumplieran con el 75% de los datos como se establece en el protocolo de monitoreo de la calidad del aire (MinAmbiente, 2010), esto quiere decir que las horas que presentaran menos de 3 datos efectivos se anulaban. Este mismo proceso se repitió para lograr definir la media de la concentración de 24 horas, en el cual los días que contaran con menos de 18 concentraciones horarias se descartaran, cumpliendo de esta forma con la validación del 75% de los datos para así representar la concentración de 24 horas para ambos contaminantes durante el periodo de febrero a junio del 2023 y enero a diciembre del 2024.

El paso siguiente consistió en la depuración de valores atípicos con el fin de garantizar la coherencia y calidad del conjunto de datos. Para ello, se implementó el criterio estadístico de ± 3 sigmas, el cual permite identificar observaciones anómalas al comparar cada valor con el rango definido por la media más o menos tres veces la desviación estándar. Esta técnica, ampliamente utilizada en el análisis de variables con distribución aproximadamente normal, se fundamenta en la regla empírica que establece que el 99,7% de los datos deben ubicarse dentro de dicho intervalo ($\mu \pm 3\sigma$). Por tanto, aquellos registros que excedieron estos límites fueron considerados como ruido estadístico y fueron excluidos del análisis.

Este análisis se desarrolló con un enfoque descriptivo, teniendo el propósito de resumir y representar visualmente los patrones de concentración de $PM_{2.5}$ y PM_{10} en el área de estudio analizada. Se buscó examinar la variabilidad diaria, semanal y mensual de dicha concentración, además de identificar posibles diferencias en los niveles de material particulado fino según los puntos de medición y los distintos momentos del día.

En primer lugar, se graficó un resumen estadístico básico de las concentraciones de $PM_{2.5}$ y PM_{10} , el cual nos permite visualizar el promedio de las concentraciones, el valor máximo y mínimo registrados y el percentil 95, el cual indica el valor por debajo del cual se encuentra el 95% de las mediciones. Por otro lado, se puede evidenciar en esta grafica la disponibilidad de datos en el transcurso del periodo evaluado. Además, este gráfico también cuenta con un histograma que

muestra la distribución de los valores de concentraciones de $PM_{2.5}$ y PM_{10} en términos de frecuencia, detallando si presentan una distribución normal, o si hay sesgos en la concentración de los contaminantes.

Las variaciones de las concentraciones de $PM_{2.5}$ y PM_{10} se plasmaron en gráficos de variación temporal para así analizar las tendencias, variabilidad y excedencias en las concentraciones de diarias o 24 horas para ambos contaminantes por nodo, permitiendo visualizar la evolución de la contaminación por material particulado, así como detallar los picos de contaminación para el periodo evaluado y comparar con los estándares nacionales e internacionales.

También se utilizaron diagramas de caja o “boxplots” representando la distribución de las concentraciones por nodo, logrando identificar los meses que presentan mayor contaminación y variabilidad, al mismo tiempo que la línea dentro de la caja nos representa la mediana y el rango intercuartílico (IQR) donde se muestra el 50% de los datos centrales, reflejando la dispersión de los valores.

Por otro lado, para los nodos 1, 2, 3, 4, 6, 7, 10, 15 y 17 se realizaron gráficas polares utilizando los registros de dirección y velocidad de viento de la estación de Pance del SVCAC del DSC, ya que estos nodos se encuentran ubicados cerca al área de influencia de dicha estación. Para los nodos 5, 8, 9, 11, 12, 13, 14, 16 y 18 se pretendía utilizar los registros de la estación de Univalle, sin embargo, esto no fue posible, ya que para el 2023 la estación de Univalle no registró ningún dato de dirección y velocidad de viento, hecho que también sucedió para el 2024 en donde en ninguna de las dos estaciones se contaba con registros de velocidad y dirección de viento. Estas gráficas resultan ser muy útiles para detallar la variabilidad de la concentración de material particulado según la dirección e intensidad del viento. En este caso se graficó de dos formas, la media para el periodo de febrero a diciembre del 2023 y, así, se graficaron las medias mensuales para el mismo periodo, siendo esto importante para analizar y comprender cómo el viento está influyendo en la dispersión de los contaminantes y a su vez en la calidad del aire. Junto con este tipo de gráficos, se realiza la respectiva rosa de vientos; una rosa de vientos de la media del periodo de febrero a diciembre y una rosa de vientos con la media mensual para este periodo, puesto que la rosa permite comprender la distribución de la dirección y velocidad del viento en el periodo analizado aquí.

Al emplear los registros de la estación de Pance (SVCA), resultó que estos eran lo suficientemente representativos para la interpretación de los nodos 1, 2, 3, 4, 6, 7, 10, 15 y 17, dado que estos se ubican en su área de influencia y presentan proximidad espacial. Esta elección permitió simplificar y estandarizar el procesamiento meteorológico, evitando la heterogeneidad derivada de trabajar con múltiples series. Adicionalmente, el uso de una única estación del SVCA permite disponer de un referente meteorológico común para varios nodos del OAC22, mientras que, al emplear

exclusivamente datos del OAC22, cada estación cuenta con registros propios que no siempre son comparables ni presentan la misma continuidad temporal.

Por último, se estableció gráficamente a través de un calendario el valor del Índice de Calidad del Aire (ICA) para permitir visualizar de una forma más sencilla y práctica la variabilidad de la calidad del aire a lo largo del periodo de febrero a diciembre del 2023 y el periodo de enero a diciembre del 2024, facilitando la identificación de patrones estacionales o mensuales en la contaminación del aire y, por otro lado, permitiendo detectar días específicos con mala calidad de aire y así indagar sus posibles causas, como incendios, tráfico intenso, entre otros.

5.4 Percepción de la calidad del aire e identificación de elementos de gobernanza.

Se evaluó la percepción de la calidad del aire en la comuna 22 a través de una encuesta que fue diligenciada de manera virtual por los participantes por medio de un formulario en Google forms. Esta encuesta estuvo dirigida tanto a habitantes de la comuna 22 como para transeúntes habituales en la comuna a los cuales previamente se les solicitó el consentimiento y confirmando que los participantes fueran mayores de edad al momento de responder la encuesta.

El tipo de muestreo utilizado en esta investigación es conocido como “Muestreo bola de nieve”, el cual permite tener contacto con poblaciones que se caracterizan por ser difícilmente accesibles a raíz de su posición económica o su ubicación geográfica-espacial. Este tipo de muestreo permite según sea el caso, estimar el tamaño de la población dependiendo de aspectos relevantes entre los grupos como tipos de vínculos y espacios de sociabilidad. Por otro lado, se utiliza esta técnica ya que se está analizando una población de la cual no se tiene la información suficiente y pertinente para definir un tamaño de muestra, esto permite agrandar la muestra inicial hasta obtener una muestra que se considere representativa o no de la población de estudio (Alloatti, 2014).

Se realizaron un total de 64 encuestas indiscriminadas tanto para transeúntes como para habitantes de la comuna. Esta encuesta se dividió en dos secciones, la primera con un componente sociodemográfico donde se le consultó a la persona el sexo, rango de edad, nivel de escolaridad, confirmación de residencia o circulación en la comuna y, por último, qué actividad realiza habitualmente en la comuna. La sección 2, se enfocó en determinar la percepción de la calidad del aire y la visibilidad o conocimiento del Observatorio Ambiental de la Comuna 22. Estas consultas permitieron obtener información más precisa sobre aspectos subjetivos relacionados con la calidad del aire y de la red ciudadana percibidos por las personas que participaron en el estudio.

Por otro lado, la identificación de los elementos de gobernanza relacionados con la calidad del aire en la Comuna 22 del distrito de Santiago de Cali se llevó a cabo mediante algunas de las preguntas de la encuesta estructurada alojada en la plataforma Google Forms. El formulario fue diseñado con base en un marco conceptual de gobernanza ambiental que contempla dimensiones tales como la

participación ciudadana, el acceso a la información, la capacidad de incidencia, la colaboración interinstitucional y la confianza en los actores institucionales.

5.5 Formulación de las estrategias de gobernanza

Finalmente se analizaron los resultados de la encuesta y, a partir de estos, se formularon estrategias por medio de una matriz DOFA para que los habitantes y transeúntes fortalezcan la gobernanza en la Comuna 22 por medio del Observatorio Ambiental de la Comuna 22 en los aspectos de la calidad del aire y, así mismo, tomar decisiones y acciones que promuevan el cuidado del aire. Con estas estrategias se buscará mejorar la gestión de la calidad del aire a través de la participación y coordinación de diferentes actores por medio del modelo de la gobernanza del aire para Colombia (MinAmbiente, 2021), el cual establece que el gobierno en conjunto con la academia, la sociedad civil y el sector privado adopten componentes clave como; inclusión y apropiación de actores, identificación de roles y responsabilidades, transparencia y acceso a la información, diálogo y participación, cogestión y coordinación, gestión del conocimiento y, como otro factor importante, se realicen rendiciones de cuentas para asegurar que se están desarrollando de forma adecuada los proyectos e iniciativas adoptadas. De este modo, implementando las herramientas anteriormente mencionadas a través de planes de acción, instrumentos de gestión, capacitación, formación, sensibilización y educación ambiental, se pueden obtener beneficios que logren mejorar la calidad del aire con una mayor participación ciudadana que tome decisiones más efectivas, basadas en evidencia científica con ayuda de los demás actores, permitiendo una gestión ambiental más eficiente, optimizando recursos y esfuerzos.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Diagnóstico de las concentraciones de material particulado PM₁₀ y PM_{2.5} en el área de estudio.

En este apartado, se presenta el diagnóstico del comportamiento de las concentraciones de material particulado PM₁₀ y PM_{2.5} basado en un análisis descriptivo de la calidad del aire y las variaciones de la misma a través del periodo de estudio, el cual se determinó de febrero a diciembre del 2023 y de enero a diciembre del 2024, utilizando gráficas de variación en el tiempo, de “boxplots” o cajas, polares e ICA (Índice de la calidad del aire) para identificar patrones de comportamiento y eventos particulares. Finalmente, se realiza la discusión de los resultados, interpretando los hallazgos en el área de estudio y contrastándolos con investigaciones similares en entornos urbanos del mundo.

6.1.1 Análisis descriptivo de los datos.

En la Figura 9 y en la Figura 10 se presenta un resumen de los datos descargados de material particulado PM₁₀ y PM_{2.5} a lo largo del periodo de febrero a diciembre del 2023 y de enero a diciembre del 2024 en el nodo 1 (Parque Ambiental Corazón de Pance) respectivamente.

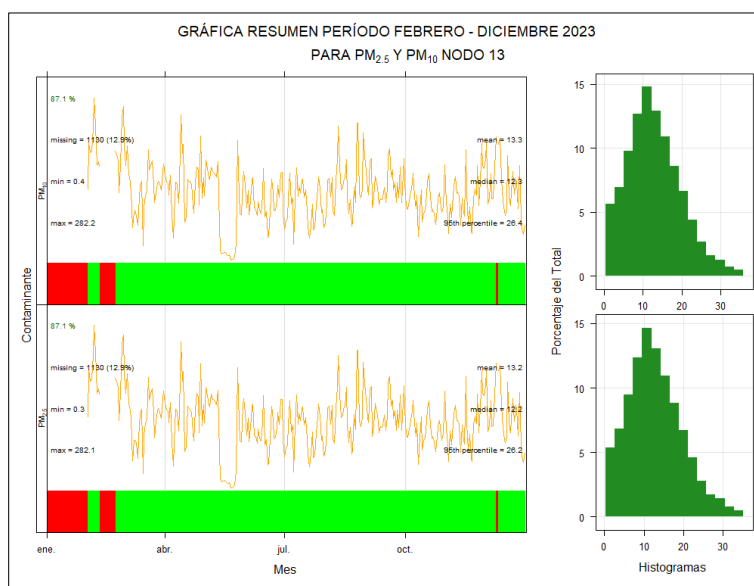


Figura 9. Concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ durante el periodo de febrero a diciembre del 2023 en el nodo 1 (Parque Ambiental Corazón de Pance).

Fuente: Elaboración propia.

Durante el procesamiento de los datos y como se observa en la anterior gráfica, se identificó que las concentraciones de $PM_{2.5}$ resultan ser iguales o incluso superiores a las de PM_{10} , lo cual evidenció una inconsistencia en la medición de los sensores. Al indagar sobre esta problemática del Observatorio Ambiental Comunitario de la Comuna 22 (OAC22), se encontró que al momento de la instalación y del mantenimiento físico de los equipos, así como del almacenamiento de la información mediante un desarrollador de software, se implementó un código de programación que realizaba de manera automática la depuración y el tratamiento de los datos, sin garantizar un mantenimiento posterior de dicha programación, situación que solo recientemente se ha abordado.

Dado el carácter comunitario del proceso, el DAGMA asumió la administración del OAC22 con el fin de efectuar una revisión integral tanto del hardware como del software, migrando la información hacia sus instalaciones. Fue en este proceso donde se detectó que el problema estaba asociado a la parametrización de los contaminantes: al momento de configurar el software, las fórmulas aplicadas para cada contaminante fueron establecidas de manera idéntica, lo que generó que las concentraciones de $PM_{2.5}$ y PM_{10} arrojaran valores similares.

Con el fin de preservar el acervo de datos generado por el Observatorio Ambiental de la Comuna 22 (OAC22), el Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente (DAGMA) ha optado por una estrategia de continuidad técnica consistente en la validación exclusiva de un único contaminante atmosférico: el material particulado fino ($PM_{2.5}$). Esta decisión se plantea como un nuevo punto de partida metodológico para el análisis y la interpretación de datos futuros,

permitiendo mantener coherencia en las series temporales sin desechar el esfuerzo previo de monitoreo ciudadano. En consonancia con este enfoque institucional, la presente investigación adopta el PM_{2.5} como variable principal de análisis, dada su reconocida peligrosidad para la salud humana por su capacidad de penetración en el sistema respiratorio y su asociación con enfermedades respiratorias y cardiovasculares.

En la Tabla 5 se depositaron los porcentajes de datos faltantes para cada nodo en los dos periodos evaluados en esta investigación, allí se evidenció que el periodo con los porcentajes más altos de datos faltantes es el de febrero a diciembre del 2023.

Tabla 5. Porcentaje de datos faltantes.

Nodo	Porcentaje Datos Faltantes	
	Periodo 2023	Periodo 2024
1	12,9	1,7
2	14	1,8
3	9,5	1,7
4	9,5	9
5	11,4	3,1
6	10,3	2,1
7	10,8	2,7
8	9,5	2,1
9	59,7	100
10	11,8	3,9
11	9,6	1,7
12	11	2,5
13	21,2	7,1
14	9,5	2,4
15	21,7	1,7
16	23	1,7
17	17,2	2
18	15,2	3,2

Fuente: Elaboración propia.

De manera general, la mayoría de los nodos contaba con un porcentaje alto de datos para el análisis, pero en casos como los nodos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 14 y 18 presentaron comportamientos particulares manteniendo un nivel aceptable de porcentajes de datos faltantes <15% en el periodo del 2023. Sin embargo, en algunos nodos no se lograron obtener datos desde febrero. Este suceso contribuyó con un aumento en el porcentaje de datos no disponibles, como el caso del nodo 9 que no conto con una buena cantidad de datos, siendo este el más dudoso (60% datos faltantes en el 2023).

La Figura 10 indica las estadísticas claves del segundo periodo estudiado donde el rango de concentraciones de $PM_{2.5}$ osciló entre un mínimo de $0.7 \mu g/m^3$ y un máximo aproximadamente de $66 \mu g/m^3$, constituyendo una media de $13.5 \mu g/m^3$ y una mediana de $12 \mu g/m^3$, mientras que el percentil 95 se registró con un valor en la concentración de $25.4 \mu g/m^3$, nodos como el 3, 4, 5, entre otros, obtuvieron valores similares, esta información se puede apreciar en los Anexos.

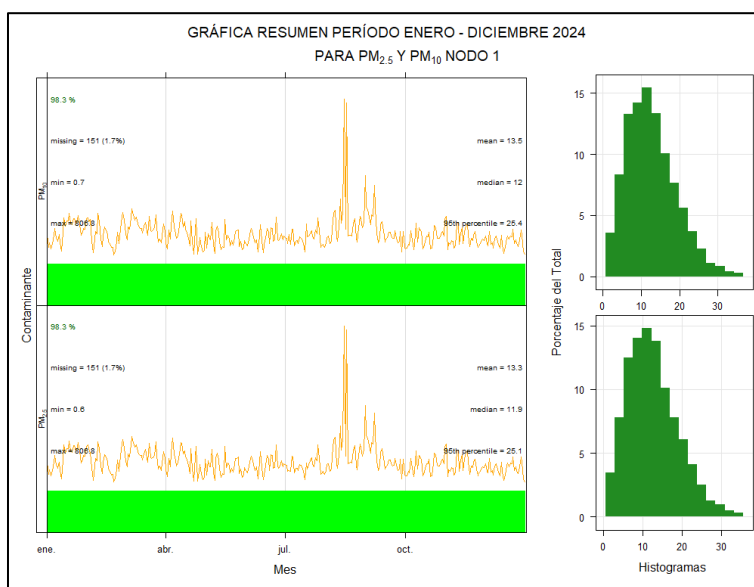


Figura 10. Concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ durante el periodo de enero a diciembre del 2024 en el nodo 1 (Parque Ambiental Corazón de Pance).

Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, en los nodos 2, 3, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 14, 15, 16, 17 y 18 se presentaron bajos porcentajes de datos faltantes $<4\%$ destacando una consistencia en las tendencias que refuerzan la validez de las mediciones y permiten inferir patrones asociados a comportamientos ciudadanos, el único nodo que representó un problema fue el nodo 9 (Colegio Bennet), ya que este no registró datos y en consecuencia no se pudo realizar un análisis del comportamiento y evolución de las concentraciones de $PM_{2.5}$ en este punto.

La barra de colores en la parte inferior de las gráficas elaboradas para cada uno de los nodos en los dos periodos evaluados, indica la disponibilidad de datos en la cual el color rojo indica los periodos o días donde no se obtuvieron datos. Las mediciones faltantes se encuentran entre el 10 de febrero y el 22 de febrero, un día en el mes de noviembre, más específicamente el 28 y los días 9 y 10 de diciembre, esto demuestra que para el periodo del 2023, en general, existe un promedio del 16% de datos ausentes. En cuanto a los datos faltantes en el año 2024 representan un promedio del 8,35% respaldando la confiabilidad de los resultados para el segundo periodo analizado.

Los histogramas confirman que la mayor parte de los valores se encuentran en rangos bajos, entre 5 y 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, concordando con la media y la mediana, mostrando una distribución asimétrica positiva (con cola larga a la derecha) confirmando que aunque la mayoría de los días tiene concentraciones bajas, existen días con concentraciones elevadas, esto podría estar relacionado con eventos específicos como el incendio que sucedió en el 2024.

6.1.2 Comportamiento de la concentración media diaria de $\text{PM}_{2.5}$ en el periodo de febrero a junio del 2023 y enero a diciembre del 2024.

La Figura 11 muestra la evolución de la concentración media diaria de $\text{PM}_{2.5}$ para el periodo de febrero a diciembre de 2023 en el nodo 8 (Universidad Libre). Se determinó que a partir de esta sección se tomaron los nodos con la menor cantidad de datos faltantes y, además, por ser los puntos de la red donde se presenta la mayor cantidad de concentraciones que sobrepasan el límite establecido en la Resolución 2254 del 2017, estableciéndose como puntos críticos de contaminación para los periodos del 2023 y 2024 analizados.

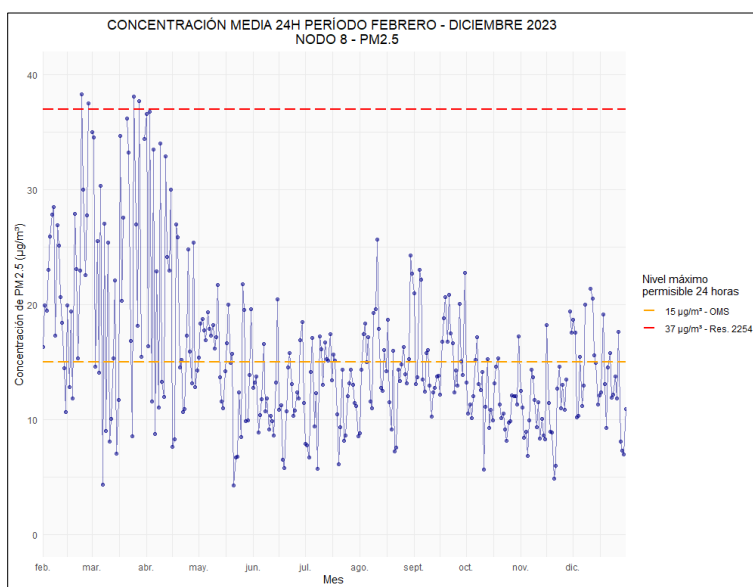


Figura 11. Concentración media diaria de $\text{PM}_{2.5}$ para el período de febrero a diciembre del 2023 en el nodo 8 (Universidad Libre).

Fuente: Elaboración propia.

El gráfico de la concentración diaria de $\text{PM}_{2.5}$ registrada por el nodo 8 (Universidad Libre) entre febrero y diciembre de 2023 evidencia una clara variabilidad estacional con mayores niveles de contaminación durante el primer trimestre del año, particularmente en marzo, donde se superaron con frecuencia tanto los límites establecidos por la OMS (15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) como por la Resolución 2254 de 2017 (37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). A partir de mayo se observa una disminución sostenida en las concentraciones, estabilizándose mayoritariamente por debajo de los umbrales internacionales hacia la segunda mitad del año. Esta reducción progresiva hacia mitad y final de año puede estar asociada a factores

como lluvias, disminución de incendios forestales o variaciones en los vientos dominantes. Aunque las superaciones del límite nacional son menos frecuentes, el umbral de la OMS es sobrepasado en numerosos días a lo largo del periodo, lo que plantea preocupaciones sobre los impactos crónicos en la salud respiratoria de la población expuesta.

Por otro lado, la Figura 12 muestra la evolución de las concentraciones de $PM_{2.5}$ en el nodo 8 (Universidad Libre) a lo largo de 2024. Estas concentraciones presentan una variabilidad marcada entre días, lo cual es esperable debido a la influencia de múltiples factores, como las condiciones meteorológicas, las fuentes locales de emisión y, en algunos casos, los procesos de transporte atmosférico. No obstante, en la gráfica se observa un aparente vacío de información desde principios de marzo hasta finales de junio. Este comportamiento no implica ausencia de mediciones durante ese periodo; se debe a una decisión adoptada en el procesamiento de datos y en el código utilizado para construir la figura, donde se filtraron (descartaron) todos los registros con valores superiores a $40 \mu g/m^3$. En consecuencia, dado que durante ese intervalo las concentraciones superaron dicho umbral, esos datos no fueron incluidos y el software no los representó gráficamente.

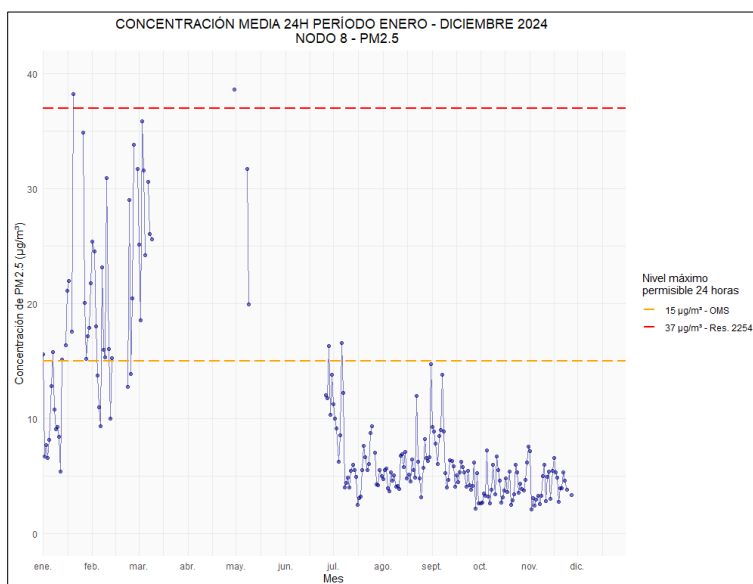


Figura 12. Concentración media diaria de $PM_{2.5}$ para el periodo de enero a diciembre del 2024 en el nodo 8 (Universidad Libre).

Fuente: Elaboración propia.

Durante el año 2023, las concentraciones diarias promedio de $PM_{2.5}$ en el nodo 8 (Universidad Libre) presentaron una variabilidad significativa con numerosos picos que superaron tanto los límites establecidos por la OMS y la Resolución 2254 de 2017. Este comportamiento fue especialmente evidente en el primer trimestre del año evidenciando condiciones críticas de calidad del aire. En contraste, el análisis correspondiente al año 2024 muestra una disminución generalizada en los niveles de $PM_{2.5}$ con una marcada reducción de los eventos extremos. Sin

embargo, durante los primeros meses de 2024 aún se observan excedencias puntuales respecto al estándar nacional, mientras que en el segundo semestre del año presenta concentraciones consistentemente por debajo de ambos umbrales. Esta diferencia sugiere una posible mejora en las condiciones de calidad del aire para el nodo 8 (Universidad Libre). La comparación entre ambos años permite evidenciar una evolución positiva en los niveles de exposición, lo cual refuerza la importancia del seguimiento continuo y el análisis temporal de la contaminación por material particulado fino en entornos urbanos. Este hecho demuestra que las concentraciones de material particulado en el 2024 fueron estables en la mayor parte del año presentando eventos puntuales que elevan las concentraciones, manteniendo el resto del año por debajo de valores críticos. Sin embargo, el pico notorio entre finales de agosto e inicios de septiembre sugiere un evento que puede tratarse o relacionarse con un incendio, un aumento de la cantidad del polvo, un aumento del tráfico u otro fenómeno.

Por otra parte, en el nodo 5 (Universidad Autónoma de Occidente) las concentraciones estuvieron cerca al umbral recomendado por la OMS, el nodo 7 (Fundación Universitaria San Martín) obtuvo valores extremos altos en las concentraciones y el nodo 17 (Colegio Nuestra Señora del Rosario) obtuvo los mayores valores promedio, esto representó una variabilidad importante entre todos los nodos teniendo una distribución sesgada a la derecha muy marcada demostrando que el percentil 95 en todos supera los $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$, siendo este valor casi el doble del sugerido por la OMS para el $\text{PM}_{2.5}$, declarando que existen periodos con episodios frecuentes de contaminación significativa.

Este aumento en las concentraciones de PM se puede evidenciar en los 18 nodos, ya que todos los niveles de $\text{PM}_{2.5}$ excedieron el límite recomendado por la OMS de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en varios días del periodo analizado. Sin embargo, en el nodo 17 (Colegio Nuestra Señora del Rosario) las concentraciones también superan el nivel máximo permisible en 24 horas establecido en la Resolución 2254 del 2017 el cual es de $37 \mu\text{g}/\text{m}^3$, este suceso se presentó en 4 días llegando a reportar un valor máximo de concentración de $46 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y teniendo en cuenta lo dicho por (Echeverry-Prieto et al., 2023) en donde cita que el DAGMA reportó una alerta naranja debido a que las concentraciones de PM excedieron los límites permisibles establecidos por la normatividad colombiana, especialmente hacia el sur de la ciudad en el 2020, afectando especialmente a los grupos sensibles como; mujeres embarazadas, niños, adultos mayores y personas con enfermedades respiratorias, las cuales debían abstenerse de realizar actividades al aire libre en consecuencia del incremento en la contaminación del aire.

Este mismo caso sucedió, por ejemplo, en agosto de 2024, fecha en la cual se presentó un incendio forestal en Pichindé, zona rural del DSC, además de otros dos incendios hacia el sur de la ciudad y en donde se concluyó que las corrientes de viento estaban desplazando el humo hacia la zona sur de la ciudad (RCN Radio, 2023). Precisamente hacia finales de agosto de 2024 se aumentó las concentraciones de PM en varios nodos relacionando este hecho con el deterioro de la calidad del aire.

Otro incendio forestal se reportó entre el 6 y el 8 de septiembre, el cual generó una desmejora en la calidad del aire y, en cooperación con aliados estratégicos y comunidad científica, la oficina de calidad del aire del DAGMA mostraron que el 6 de septiembre debido a los incendios forestales las concentraciones de $PM_{2.5}$ llegaron a un promedio de $26 \mu\text{g}/\text{m}^3$ generando un impacto en la salud y deteriorando el Índice de Calidad del Aire (ICA) en el mes de septiembre (El Tiempo, 2024). Se debe tener en cuenta que la exposición prolongada a niveles superiores a $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, aunque estén por debajo de la norma nacional, constituyen o se relacionan con un aumento en las enfermedades respiratorias y cardiovasculares, generando efectos negativos en niños y adultos mayores (Liu et al., 2019).

6.1.2.1 Variación temporal de $PM_{2.5}$ para el periodo de febrero a diciembre del 2023 y enero a diciembre del 2024.

La Figura 13 permite analizar las concentraciones de $PM_{2.5}$ en distintos periodos temporales; distribución horaria por días de la semana, distribución horaria en un día, distribución mensual y distribución por días de la semana y, de esta manera, poder observar y detallar patrones en el comportamiento del contaminante en el área de estudio. En este análisis se utilizaron las concentraciones de $PM_{2.5}$ en el nodo 5 (Universidad Autónoma de Occidente), el cual permite hacer una comparación entre los dos periodos evaluados.

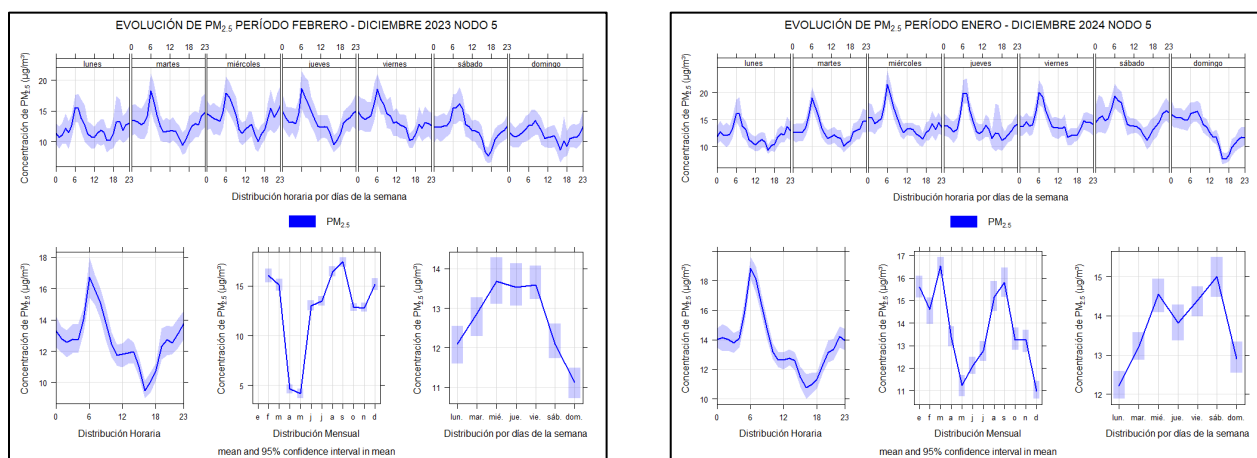


Figura 13. Variación temporal de $PM_{2.5}$ en el nodo 5 (Universidad Autónoma de Occidente) para el período de febrero a diciembre del 2023 y el período de enero a diciembre del 2024.

Fuente: Elaboración propia.

Durante el periodo comprendido entre febrero y diciembre de 2023, el nodo 5 (Universidad Autónoma de Occidente) presentó concentraciones promedio de $PM_{2.5}$ moderadas y estables con picos horarios que se concentran entre las 6:00–8:00 a.m. y las 8:00–10:00 p.m., probablemente

relacionados con flujos vehiculares y actividades humanas. La distribución semanal muestra mayores concentraciones de miércoles a viernes, disminuyendo hacia el fin de semana con concentraciones en los domingos significativamente más bajas. En cuanto a la distribución mensual, se observan niveles bajos en abril y mayo con un aumento fluctuante hasta diciembre, sin embargo, el mes con las mayores concentraciones es septiembre.

En contraste, el año 2024 exhibe una disminución generalizada en los niveles de PM_{2.5} con promedios más bajos tanto en la distribución horaria como en la mensual y semanal. Los picos horarios permanecen en las mismas franjas (mañana y noche), pero con menores valores y menor dispersión relativa. Notablemente, la concentración mensual se mantiene alta incluso en meses como agosto y septiembre. Además, la distribución por día de la semana revela un cambio importante: los valores más altos se observan ahora durante los fines de semana, especialmente sábado y domingo, lo que podría reflejar nuevas fuentes emisoras o cambios en los patrones de movilidad y actividades humanas.

Los resultados muestran un patrón con un comportamiento marcado en el cual las concentraciones del contaminante aumentan a partir de las 06:00 a.m. hasta aproximadamente las 04:00 p.m. donde se presenta una disminución, sin embargo, a partir de las 05:00 p.m. nuevamente se presenta la tendencia al alza de las concentraciones demostrando que este crecimiento se debe a la hora pico el cual se presenta desde las 04:00-07:00 p.m. Diversos estudios han correlacionado el aumento del tráfico con el incremento de las concentraciones de PM como lo indican Pant y Harrison (2013), donde explican que el aumento en las emisiones de PM de los vehículos, no solamente provienen del tubo de escape, sino también del desgaste de piezas del vehículo. Otra investigación realizada por Echeverry et al., (2021), indica que en las últimas dos décadas se ha presentado un crecimiento continuo en el parque automotor de la ciudad de Cali, destacándose un incremento notable en la cantidad de motocicletas, las cuales, según el Inventario de Emisiones, son las principales responsables de la contaminación por PM. Una investigación realizada en Padang city, Indonesia, confirma que las emisiones de PM originadas por el alto tráfico en áreas urbanas de los países en vía de desarrollo son altas, más específicamente en las horas punta de la mañana y de la tarde donde suelen presentarse los mayores niveles de contaminación debido a las altas emisiones de los vehículos (Bachtar et al., 2025).

Distintas investigaciones han confirmado la relación tangible entre el aumento del parque automotor y el detrimento de la calidad del aire, por ejemplo (Echeverry-Prieto et al., 2023) argumenta que para el 2020, el Distrito de Santiago de Cali (DSC) contaba con 737.478 vehículos, de los cuales el 94% correspondía a vehículos privados y, finalizando este mismo año, el DSC cerraba con una tasa de 295 vehículos por cada 1000 habitantes, ocupando el segundo lugar en la lista de ciudades colombianas con mayor número de vehículos nuevos. También, para enero del 2020, se reportó concentraciones de PM_{2.5} por encima de 37 µg/m³ durante más de 48 horas continuas en la estación de Univalle del SVCAC operado por el DAGMA. Para comprender mejor

el flujo vehicular en la zona de estudio se analiza el trabajo de investigación “Cambios en la calidad del aire asociados al tráfico automotor durante el aislamiento por COVID-19 en Santiago de Cali, Colombia” (Echeverry-Prieto et al., 2023).

La Figura 14 muestra que el flujo vehicular crece de manera constante a partir de las 05:00 a.m., esta dinámica podría estar asociada a las jornadas estudiantiles y laborales. Por otro lado, el decrecimiento se presenta hacia las 08:00 p.m. resaltando que en el comportamiento diurno no se observa una disminución del flujo vehicular en las horas de “pico y placa”, en contraste, en este periodo de tiempo se presenta un mayor flujo de vehículos, este análisis se realizó por medio de 3 cámaras de foto detección que están ubicadas cerca de las estaciones de monitoreo del SVCAC, las cuales son; ERA, CAÑAVERALEJO y UNIVALLE. Para nuestro estudio, es de vital importancia la cámara “C.10”, ya que es la más cercana a la comuna 22, como se puede observar en la Figura 15.

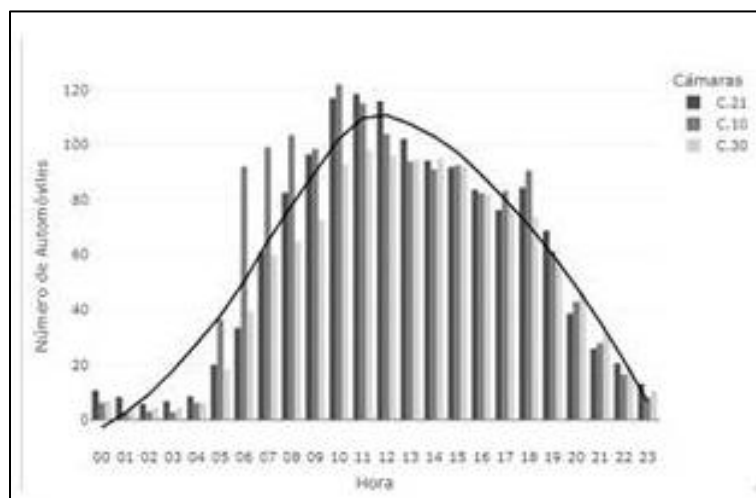


Figura 14. Comportamiento del número de automóviles por hora.

Fuente: (Echeverry-Prieto et al., 2023).

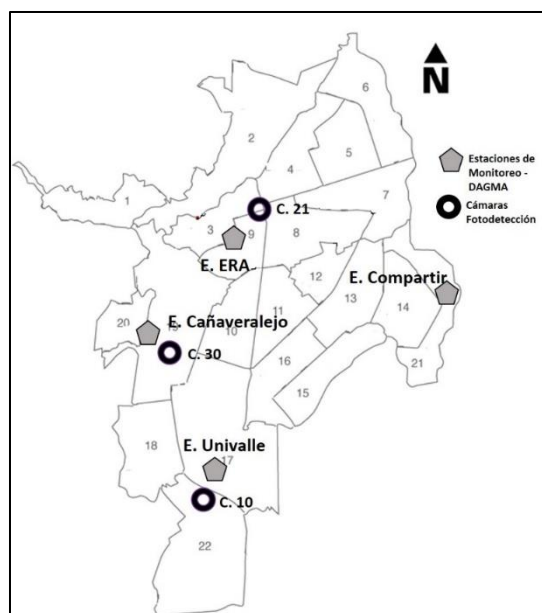


Figura 15. Distribución de cámaras de foto detección.
Fuente: (Echeverry-Prieto et al., 2023).

6.1.2.2 Distribución de la concentración media de $PM_{2.5}$ por nodo para el periodo de febrero a diciembre del 2023 y enero a diciembre del 2024.

La Figura 16 permite observar la distribución de las mediciones de $PM_{2.5}$ para cada nodo en el periodo de febrero a diciembre del 2023, de esta manera se puede identificar los valores atípicos, dispersión y las medianas.

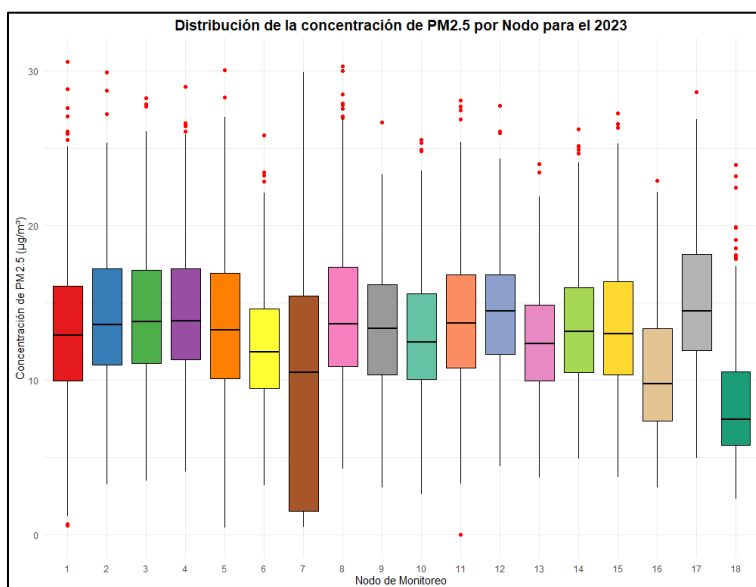


Figura 16. Distribución de la concentración media de $PM_{2.5}$ por nodo para el periodo de febrero a diciembre del 2023.
Fuente: Elaboración propia.

El gráfico tipo boxplot ilustra la distribución de las concentraciones de $PM_{2.5}$ registradas durante el año 2023 en los 18 nodos de monitoreo, revelando una variabilidad significativa entre sitios. Se observa que la mediana de concentración en la mayoría de los nodos oscila entre 10 y 15 $\mu g/m^3$, con nodos como el 3, 4, 5, 10, 11, 12, 13, 14 y 17 mostrando valores centrales por encima del umbral recomendado por la OMS, lo que sugiere una exposición continua a niveles potencialmente perjudiciales para la salud. El nodo 7 (Fundación Universitaria San Martín) destaca por tener una dispersión particularmente amplia, con un rango intercuartílico notable y una mediana inferior, lo que podría indicar inconsistencias o una dinámica atípica en la medición para este punto específico. Adicionalmente, se evidencian múltiples valores atípicos (outliers) por encima de 25 $\mu g/m^3$ en varios nodos, especialmente en los nodos 1 al 5 y del 10 al 15, lo que refleja la presencia de eventos episódicos de alta contaminación posiblemente asociados a condiciones meteorológicas desfavorables o actividades antropogénicas específicas.

La Figura 17 revela una importante dispersión en los niveles de concentración de $PM_{2.5}$ entre los diferentes nodos de monitoreo durante el año 2024, evidenciando una mayor presencia de valores atípicos extremos (outliers), especialmente en los nodos 8 (Universidad Libre) y 13 (Holguines Trade Center), donde se registran concentraciones superiores a los 100 $\mu g/m^3$, lo cual excede ampliamente los niveles establecidos por la OMS y la normativa nacional. El nodo 8 (Universidad Libre) destaca de forma crítica, al presentar una caja (boxplot) de gran amplitud y una cantidad inusualmente alta de outliers, lo que sugiere eventos de contaminación severa o posibles inconsistencias en los datos. A pesar de ello, la mediana de concentración en la mayoría de los nodos se encuentra por debajo de los 20 $\mu g/m^3$, lo que indica que, en términos generales, los niveles medios diarios de $PM_{2.5}$ se mantuvieron en un rango moderado, aunque con picos extremos puntuales que requieren un mayor análisis. La variabilidad entre nodos también es significativa, lo cual podría estar asociado a diferencias en las fuentes de emisión locales, condiciones meteorológicas o el desempeño técnico de los sensores ciudadanos.

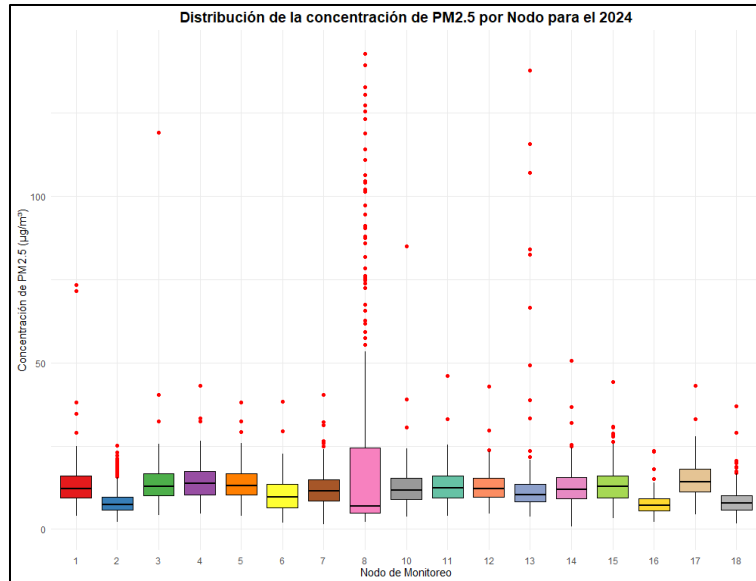


Figura 17. Distribución de la concentración media de PM_{2.5} por nodo para el período de enero a diciembre del 2024.

Fuente: Elaboración propia.

En comparación con el gráfico correspondiente al año 2023, se observa una reducción generalizada en la mediana de concentraciones de PM_{2.5} en la mayoría de los nodos para el año 2024, lo que podría sugerir una mejoría en la calidad del aire. Sin embargo, este avance aparente se ve contrarrestado por el aumento en la cantidad e intensidad de los outliers, especialmente en ciertos nodos específicos como el 8 (Universidad Libre), donde el comportamiento anómalo se vuelve mucho más pronunciado que en 2023. En ese sentido, si bien hay evidencia de una reducción central en los valores, la alta dispersión y la ocurrencia de eventos extremos ponen en duda la estabilidad del sistema de monitoreo y demandan una revisión detallada de las condiciones de operación, calibración de los sensores o factores contextuales que puedan explicar estas anomalías. Esto sugiere que no solo se deben considerar las tendencias centrales, sino también los extremos como indicadores clave para la gestión de la calidad del aire y la gobernanza ambiental en la Comuna 22.

6.1.3 Media de la rosa de los vientos para el periodo febrero a diciembre del 2023.

La Figura 18 presenta la rosa de los vientos promedio para el periodo comprendido entre febrero y diciembre de 2023. No obstante, esta representación es válida para todos los nodos, dado que solo se logró acceder a los registros de dirección y velocidad del viento de una única estación del SVCA y únicamente para el año 2023 como se mencionó anteriormente. En consecuencia, las gráficas resultantes son idénticas para cada nodo. A pesar de esta limitación, la figura constituye una herramienta útil para visualizar la frecuencia y la intensidad del viento según las distintas direcciones cardinales a lo largo del periodo analizado.

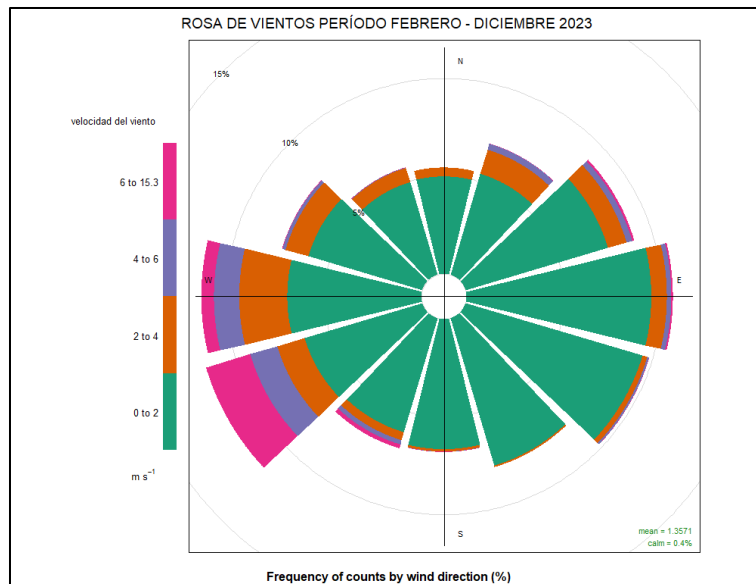


Figura 18. Media de la rosa de los vientos para el periodo febrero a diciembre del 2023.

Fuente: Elaboración propia.

Como se logra observar la mayoría de los vientos provienen del Este (E) y Oeste (W) con una menor contribución del Suroeste (SW) y Noreste (NE), a su vez, esto indica que estos son los sectores dominantes en la circulación del viento en este nodo.

Se observa también que la mayoría de los vientos están en el rango de 0 a 4 m/s, esto podría sugerir que las condiciones de viento en este nodo son mayormente moderadas. Además, existen algunos eventos de vientos más intensos, especialmente en las direcciones Oeste (W) y Este (E). La velocidad media del viento es 1,3571 m/s, indicando un régimen de viento suave a moderado, mientras que la calma tiene un 0,4%, sugiriendo que en casi todo el periodo hubo circulación de aire y pocas condiciones de estancamiento.

Los vientos predominantes alcanzan frecuencias cercanas al 15%, siendo especialmente desde el Este y Oeste. Otros sectores con menor frecuencia son el Norte (N) y Sur (S).

Un estudio realizado por (Echeverry et al., 2021) en el DSC, afirma que las concentraciones de PM_{2.5} llegan a su punto más bajo en el rango horario de mayor tráfico, es decir, en la hora pico, demostrando que el comportamiento del PM no está regido por las dinámicas del tráfico. Por otro lado, en este mismo estudio aseguran que la variable de mayor influencia en este rango horario son las corrientes de viento que aumentan de manera considerable cerca de las 06:00 p.m., este comportamiento en las corrientes de viento se puede contrastar con los datos obtenidos por la media de la rosa de vientos para el periodo febrero a diciembre del 2023 (Fig. 18), en donde se evidencia que la mayor frecuencia de las corrientes proviene desde el este. Sin embargo, también aparecen corrientes provenientes del oeste, en la investigación de (Echeverry et al., 2021) se confirma que una gran parte de la jornada, específicamente en la estación de Univalle se registra

que las corrientes de viento provienen principalmente del este, sin embargo, los vientos que se presentan aproximadamente a las 06:00 p.m. son más fuertes que el resto del día y provienen del Noroeste.

Estas corrientes de viento logran dispersar las PM de tal manera que las concentraciones alcancen su punto más bajo cerca de las 06:00 p.m. pero el patrón indica que después de esta hora, las concentraciones nuevamente toman una tendencia a incrementar, lo que puede estar relacionado con el incremento de la velocidad del viento y la resuspensión de partículas, como lo demuestra (Linda et al., 2025) quien indica que el viento puede causar una resuspensión de las PM. Este fenómeno se presenta cuando las partículas depositadas en el suelo se levantan de este debido a las fuertes corrientes de viento. Así, entonces, una partícula puede ser transportada por el viento y causar contaminación, la Figura 19 muestra la curva extraída en la relación entre la velocidad del viento y las concentraciones de PM.

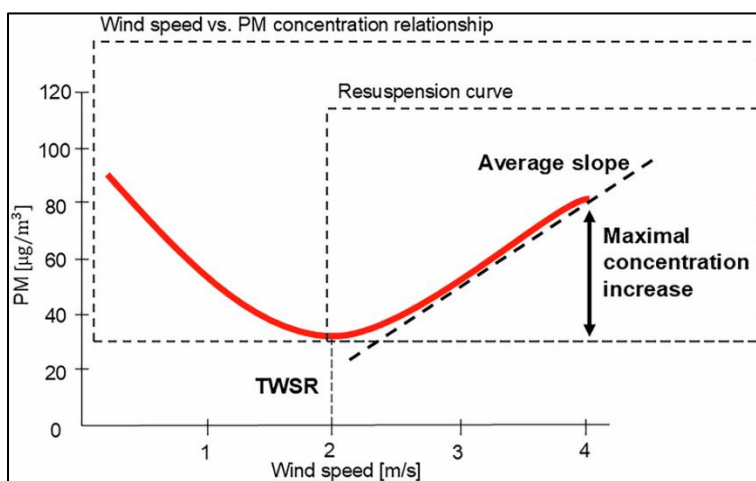


Figura 19. Relación entre la concentración de PM y la velocidad del viento.

Fuente: (Linda et al., 2025).

6.1.4 Rosa de los vientos mensual para el periodo de febrero a diciembre del 2023.

La Figura 20 nos muestra la rosa de los vientos para cada mes para el periodo de febrero a diciembre del 2023, una herramienta que permite representar la frecuencia y la intensidad del viento en distintas direcciones cardinales a lo largo del periodo analizado.

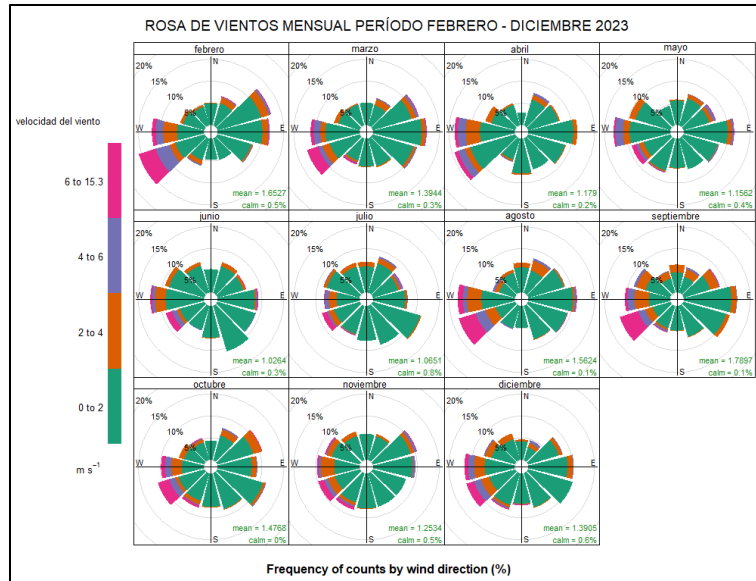


Figura 20. Rosa de los vientos mensual para el período de febrero a diciembre del 2023.

Fuente: Elaboración propia.

Como se logra observar en la mayoría de los meses los vientos soplan mayormente desde el Oeste (W) y Suroeste (SW), existen diferencias en la velocidad del viento entre los meses, mientras que en otros meses se muestra una mayor proporción de vientos fuertes, como es el caso de febrero a marzo y de julio a septiembre. En el periodo de abril a junio, se presenta un régimen de vientos moderados con una predominancia similar del Oeste y Suroeste y una menor proporción de vientos intensos con la menor velocidad promedio (1,0264 m/s) en el mes de junio.

Por otro lado, septiembre muestra la mayor velocidad promedio (1,7897 m/s) contribuyendo con vientos más fuertes, finalmente en el periodo de octubre a diciembre se mantiene una distribución similar, aunque con una menor proporción de vientos fuertes en diciembre. La calma es mínima en todos los meses con un valor menor de 0,6%, indicando que siempre existe circulación del aire.

6.1.5 Concentración media de $PM_{2.5}$ para el periodo de febrero a diciembre del 2023.

La Figura 21 muestra la distribución de los niveles de contaminación por $PM_{2.5}$ en función de la dirección y velocidad del viento, siendo esto importante para encontrar posibles fuentes potenciales de contaminación y su influencia en el área. Para este análisis se utilizó la gráfica polar en el nodo 7 (Fundación Universitaria San Martín) en concordancia con la gráfica tipo boxplot, puesto que para este periodo el nodo 7 fue el que presentó una dispersión particularmente amplia en las concentraciones implicando una atención especial en este punto.

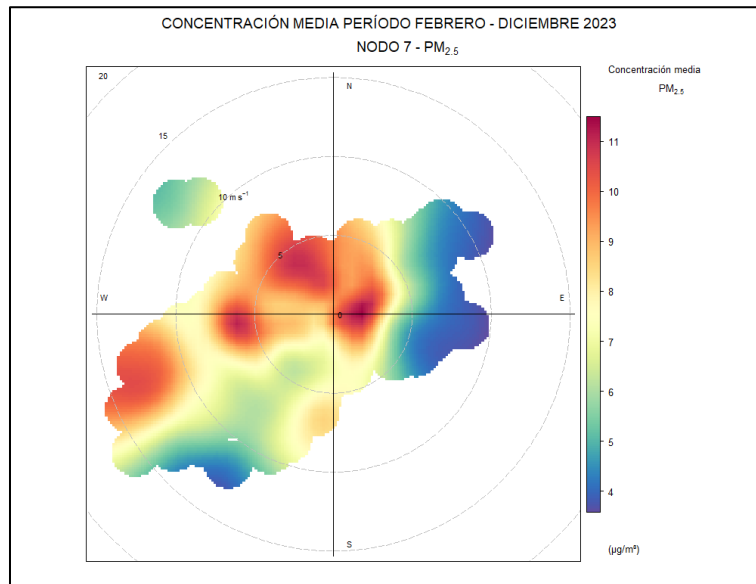


Figura 21. Concentración media de $PM_{2.5}$ para el período de febrero a diciembre del 2023 en el nodo 7 (Fundación Universitaria San Martín).

Fuente: Elaboración propia.

El gráfico polar presentado muestra la concentración media anual de $PM_{2.5}$ registrada en el nodo 7 (Fundación Universitaria San Martín) durante el periodo comprendido entre febrero y diciembre de 2023, combinando dirección y velocidad del viento con los niveles de este contaminante. La visualización utiliza una interpolación de tipo windrose con una escala cromática que va del azul (concentraciones más bajas, $<4 \mu\text{g}/\text{m}^3$) al rojo oscuro ($>11 \mu\text{g}/\text{m}^3$), permitiendo identificar visualmente las direcciones predominantes asociadas a mayores niveles de material particulado fino. Se observa que las mayores concentraciones de $PM_{2.5}$ tienden a provenir de los cuadrantes oeste (W) y suroeste (SW), lo que sugiere que las fuentes emisoras podrían estar ubicadas en esas direcciones con respecto al nodo, posiblemente asociadas a actividades urbanas, industriales o de tránsito vehicular intensivo. Además, el patrón de dispersión indica velocidades de viento moderadas (alrededor de 5–10 m/s), que contribuyen a transportar y distribuir el contaminante en esas direcciones.

6.1.6 Concentración media mensual de $PM_{2.5}$ para el periodo de febrero a diciembre del 2023.

La Figura 22 muestra la distribución de las concentraciones de $PM_{2.5}$ para cada mes en el periodo de febrero a diciembre del 2023 en diagramas polares en función de la dirección y velocidad del viento.

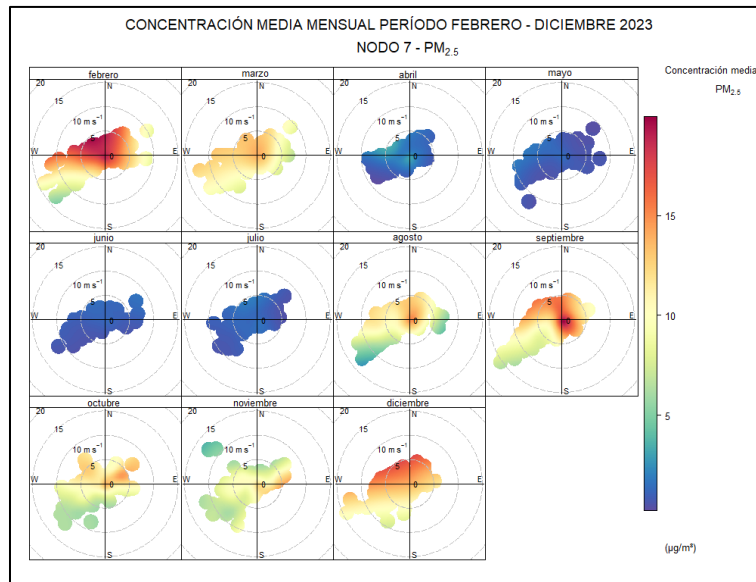


Figura 22. Concentración media mensual de $PM_{2.5}$ para el período de febrero a diciembre del 2023 en el nodo 7 (Fundación Universitaria San Martín).

Fuente: Elaboración propia.

En el nodo 7 (Fundación Universitaria San Martín) durante el periodo de febrero a diciembre de 2023, los diagramas tipo windrose permiten evaluar simultáneamente la dirección y velocidad del viento junto con las concentraciones del contaminante. Se observa un patrón estacional claro, en los primeros meses del año, especialmente febrero y marzo, se registran las concentraciones más elevadas (superiores a $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$), predominantemente asociadas a vientos del suroccidente (SW), lo cual sugiere fuentes emisoras relevantes en esa dirección. A partir de abril y durante todo el primer semestre (hasta julio), se evidencia una disminución significativa en los niveles de $PM_{2.5}$, manteniéndose por debajo de $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la mayoría de los casos, posiblemente debido a condiciones meteorológicas más favorables para la dispersión de contaminantes, como lluvias o mayor ventilación atmosférica.

A partir de agosto, se observa un repunte progresivo en las concentraciones, alcanzando nuevamente niveles elevados en septiembre y diciembre, con direcciones dominantes nuevamente hacia el suroeste, lo que refuerza la hipótesis de una fuente recurrente ubicada en esa dirección. Estos resultados resaltan la importancia de considerar tanto la variabilidad mensual como la influencia del transporte eólico en la interpretación de la calidad del aire y pueden orientar intervenciones específicas en los meses y zonas de mayor riesgo. Asimismo, el comportamiento de las concentraciones en los nodos 1, 2, 3, 4, 6, 10, 15 y 17 evidencia un patrón similar en la dispersión del $PM_{2.5}$. Esta similitud se aprecia en las gráficas polares elaboradas para cada nodo, las cuales se presentan en los anexos de este documento.

6.1.7 Calendario con el Índice de Calidad del Aire (ICA) para el periodo de febrero a diciembre del 2023.

La Figura 23 muestra un calendario con el Índice de Calidad del Aire (ICA) para cada día entre febrero y diciembre del 2023 en el nodo 8 (Universidad Libre), ya que en ocasiones la utilización de graficas lineales y polares puede que no resulten comprensibles al público en general, siendo este un formato visual más sencillo para entender la evolución del contaminante y la calidad del aire en el área de estudio.

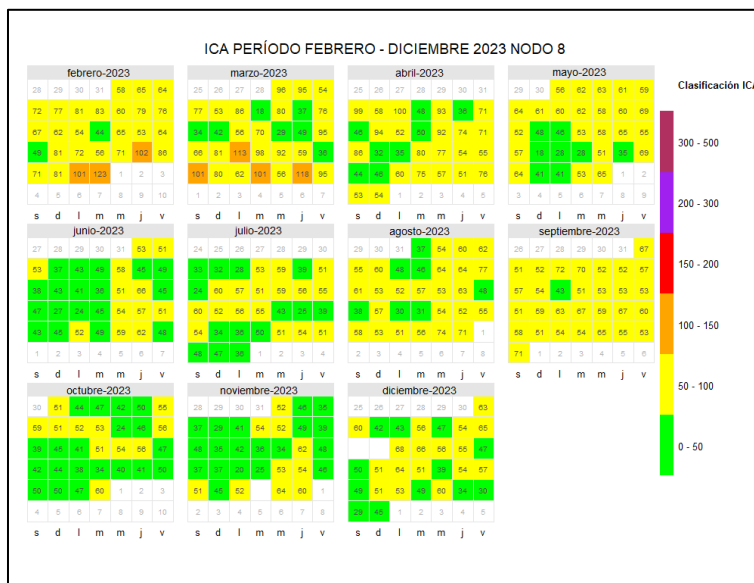


Figura 23. ICA diario para el período de febrero a diciembre del 2023 en el nodo 8 (Universidad Libre).

Fuente: Elaboración propia.

El gráfico presentado ilustra el comportamiento diario del Índice de Calidad del Aire (ICA) en el nodo 8 (Universidad Libre) durante el periodo comprendido entre febrero y diciembre de 2023. Esta visualización tipo calendario permite identificar con claridad la variabilidad temporal del ICA a lo largo del año, clasificando los niveles de contaminación según la escala cromática establecida, donde los tonos verdes representan condiciones "Buenas" (0–50), los amarillos indican una calidad del aire "Aceptable" (51–100), los naranjas se asocian a una calidad "Dañina para grupos sensibles" (101–150), y los tonos rojos o superiores reflejan niveles de contaminación más severos.

Durante los primeros ocho meses del año (febrero a septiembre), se evidencia una mayor frecuencia de días con ICA en las categorías "Aceptable" y "Dañina para grupos sensibles", con especial énfasis en febrero y marzo, meses en los que se registran numerosos días con valores superiores a 100, indicando afectación para poblaciones vulnerables. Este comportamiento sugiere una posible influencia estacional relacionada con fenómenos como el aumento de temperaturas,

estabilidad atmosférica o incendios de cobertura vegetal en zonas circundantes, que pueden incrementar la concentración de material particulado fino.

A partir de octubre se observa una mejora sustancial en la calidad del aire, con predominio de días categorizados como "Buenos", especialmente en los meses de octubre y noviembre. Esta disminución en los niveles de contaminación podría estar asociada a factores meteorológicos como mayores precipitaciones, que favorecen la deposición húmeda del material particulado, así como a una posible reducción de emisiones locales. Sin embargo, en diciembre vuelve a evidenciarse una ligera tendencia al alza con varios días en categoría "Aceptable", lo cual podría estar relacionado con actividades festivas, aumento en la movilidad y condiciones de inversión térmica comunes durante esta época del año. En conjunto, el análisis revela un patrón cíclico donde los primeros y últimos meses del año presentan condiciones más desfavorables para la calidad del aire, mientras que el segundo semestre, particularmente entre julio y noviembre, muestra un comportamiento más benigno.

Por otro lado, la Figura 24 grafica el Índice de Calidad del Aire (ICA) para cada día entre enero y diciembre del 2024 en el nodo 8 (Universidad Libre), en este gráfico se evidencia un deterioro significativo en la calidad del aire durante el primer semestre, especialmente entre marzo y junio, donde predominan valores en categorías "Dañina para grupos sensibles" (naranja, 101–150), "Dañina para la salud" (rojo, 151–200), "Muy dañina para la salud" (morado, 201–300) e incluso en varios días de abril y mayo se observan registros en la categoría "Peligrosa" (>300, marrón oscuro), alcanzando valores extremos como 649 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Esta situación refleja una grave afectación atmosférica. A partir de julio, se presenta una mejora notoria y sostenida en la calidad del aire con valores dentro de la categoría "Buena" (verde, 0–50) durante la mayoría de los días del segundo semestre (julio a diciembre), lo cual sugiere una transición estacional favorable y/o la acción de lluvias persistentes que favorecieron la remoción del material particulado fino en la atmósfera.

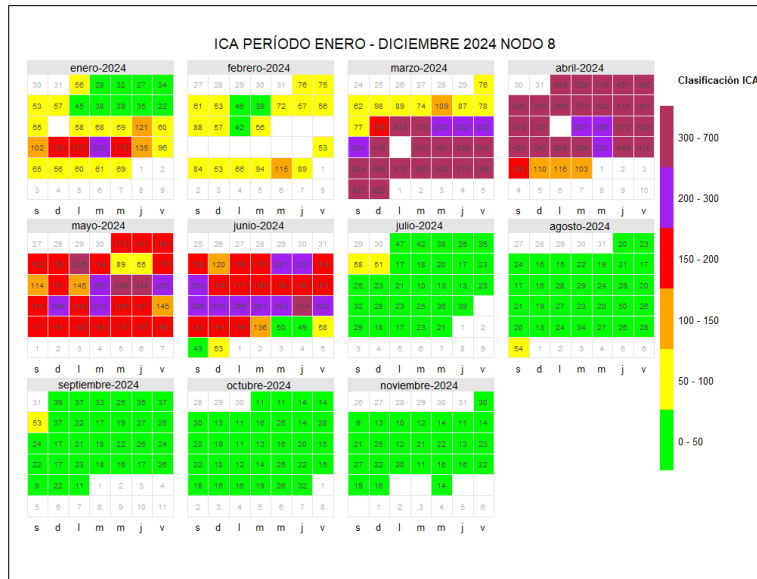


Figura 24. ICA diario para el período de enero a diciembre del 2024 en el nodo 8 (Universidad Libre).

Fuente: Elaboración propia.

En comparación con el año 2023, el año 2024 presenta un comportamiento mucho más extremo y preocupante en términos de calidad del aire durante el primer semestre, mientras en 2023 los valores se mantuvieron mayoritariamente en las categorías "Buena" y "Aceptable", con algunos días puntuales en nivel "Dañino para grupos sensibles", el año 2024 registra una concentración alarmante de días con ICA peligrosamente elevados, alcanzando umbrales críticos de afectación sanitaria en marzo, abril, mayo y junio. Este cambio sugiere una alteración significativa en la dinámica de emisiones o en las condiciones atmosféricas locales. Sin embargo, también destaca que la segunda mitad del 2024 muestra una calidad del aire más estable y favorable que en 2023, con una mayor proporción de días verdes (ICA < 50). Esta oscilación marcada entre ambos semestres evidencia una alta estacionalidad del fenómeno, mostrando una oportunidad para la formulación de políticas públicas y estrategias de mitigación, en especial en torno a la gestión del riesgo durante los meses de mayor contaminación, tema que podría abordarse en una futura investigación.

6.1.8 Correlación entre nodos para PM_{2.5}.

La Figura 25 presenta la matriz de correlación entre los 18 nodos de monitoreo, elaborada a partir de las concentraciones de PM_{2.5} registradas en ambos periodos de estudio (2023 y 2024) e integradas en un único análisis. En consecuencia, la matriz resume en un mismo gráfico el grado de similitud entre los patrones de concentración del contaminante entre estaciones, considerando conjuntamente la información de los dos años evaluados.

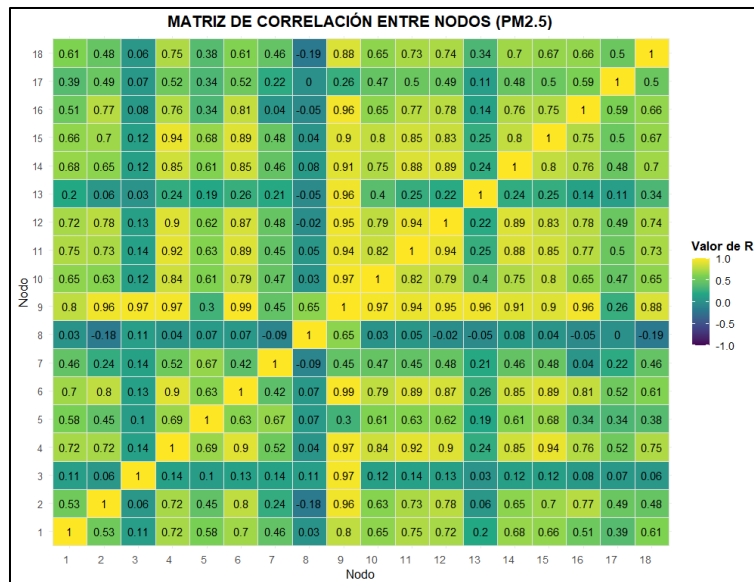


Figura 25. Correlación entre todos los nodos para PM_{2.5}.

Fuente: Elaboración propia.

La escala de colores representa el coeficiente de correlación de Pearson (R), que varía entre -1 y 1, indicando el grado de asociación lineal entre las concentraciones de PM_{2.5} medidas en cada par de nodos. Valores cercanos a 1 (color amarillo) indican una fuerte correlación positiva, es decir, ambos nodos tienden a registrar aumentos y disminuciones simultáneamente en los niveles de PM_{2.5}. Por el contrario, valores cercanos a -1 (tonalidades azules) reflejan una correlación negativa, lo cual implica que mientras un nodo aumenta en concentración, el otro tiende a disminuir. Valores cercanos a 0 (tonos verdosos o azulados) indican ausencia de correlación lineal significativa.

En términos generales, se observa una fuerte correlación entre un conjunto de nodos, en particular entre los nodos 4, 5, 6, 9, 10, 11 y 12, con valores de R superiores a 0.90 en múltiples combinaciones. Esto sugiere que dichos nodos podrían estar expuestos a condiciones atmosféricas y fuentes emisoras similares o que comparten una proximidad geográfica o características topográficas que favorecen patrones comunes de dispersión y acumulación de contaminantes. El nodo 8 (Universidad Libre), sin embargo, presenta correlaciones significativamente más bajas e incluso valores negativos con varios nodos (por ejemplo, con los nodos 2, 7, 13 y 18), lo cual puede indicar una dinámica local atípica o la presencia de registros anómalos, eventos extremos o diferencias en la calidad de los datos recolectados. Asimismo, la correlación relativamente baja entre el nodo 13 (Holgunes Trade Center) y varios otros nodos podría estar vinculada a factores como microclimas, características locales de viento o fuentes específicas de emisión.

Este tipo de análisis es fundamental para identificar posibles redundancias entre estaciones, optimizar la red de monitoreo, evaluar la representatividad espacial de los datos y comprender mejor las dinámicas regionales y locales de la contaminación por material particulado fino. Además, las diferencias en la correlación entre nodos podrían guiar futuras campañas de medición,

estrategias de modelamiento atmosférico y decisiones en políticas públicas orientadas a la gestión de la calidad del aire que podrían analizarse en futuras investigaciones.

6.2 Percepción de la calidad del aire por parte de los ciudadanos que transitan y habitan la zona de influencia del Observatorio Ambiental de la Comuna 22 del Distrito de Santiago de Cali.

Las encuestas se aplicaron mediante un proceso de difusión comunitaria informal y dirigida, aprovechando la participación de residentes de la comuna que hacen parte tanto del comité como de la red ciudadana. Dado que estas personas suelen realizar sus reuniones de forma virtual —con el fin de facilitar la asistencia frente a limitaciones de tiempo, desplazamiento y horarios—, se les compartió el enlace de la encuesta por medios digitales, permitiendo así su amplia distribución. Gracias a la colaboración de estos miembros activos, el formulario fue socializado con otros habitantes y visitantes de la comuna, logrando recopilar un total de 64 respuestas.

6.2.1 Perfil de los encuestados

Al realizar la encuesta por el método de “bola de nieve” las personas seleccionadas para realizar la encuesta le compartieron el enlace a nuevos participantes entre los cuales podrían ser amigos, familiares, conocidos, etc., que cumplieran con el rasgo distintivo o la característica específica de residir o transitar constantemente la comuna en labores como estudio, trabajo, etc. Así, entonces, la muestra estuvo compuesta por 35 mujeres y 29 hombres reflejando una mayor participación por parte del sexo femenino en la encuesta.

Como se evidencia en la Tabla 6, la mayoría de las personas encuestadas residen en la comuna 22, representando un 81,3% del total de los encuestados. Por otro lado, el 6,3% solamente labora en la comuna, mientras que el 12,5% solo se desplaza hacia la comuna eventualmente. En cuanto al nivel de escolaridad reportado en los resultados de la encuesta, esta indica que el 54,7% de encuestados poseen un posgrado o especialización como mayor grado de escolaridad, el 29,7% tiene un título profesional, demostrando que el 84,4% de los encuestados tiene un alto nivel de escolaridad, por otro lado, el 10,9% afirma ser técnico/a o tecnólogo/a y finalmente el 4,7% solo cuenta con estudios de básica secundaria, no se reportaron casos de personas sin ningún tipo de nivel educativos entre los encuestados.

Tabla 6. Perfil personas encuestadas.

CATEGORÍA	FRECUENCIA	PORCENTAJE
Identidad de Género		
Mujer	35	54,7%
Hombre	29	45,3%
Relación con la comuna		
Vive	52	81,3%
Labora	4	6,3%
Visita Ocasional	8	12,5%
Nivel de escolaridad		
Posgrado o especializaciones	35	54,7%
Profesional	19	29,7%
Técnico/a o Tecnólogo	7	10,9%
Básica Secundaria	3	4,7%

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de la encuesta.

Entre los encuestados, participaron personas en diversos rangos de edades; el 67,2% se encuentra en el rango de 50 o más años, el 7,8% se pertenece al rango de 50-35 años, mientras que los rangos de 35-25 años y 25-18 años comparten el mismo porcentaje de encuestados con un 12,5% de participación como se puede evidenciar en la Tabla 7.

Tabla 7. Rango de edad de los encuestados.

RANGO DE EDAD	PARTICIPANTES	PORCENTAJE
50 o más años	43	67,2%
35-50 años	5	7,8%
25-35 años	8	12,5%
18-25 años	8	12,5%

Fuente: Elaboración propia.

Esto argumenta que más del 50% de los encuestados son personas de más de 35 años, demostrando que la mayoría de los participantes se encuentran en un rango de edad avanzada, cabe aclarar que dentro de la encuesta no se contó con la participación de menores de edad debido a la ley de tratamiento de datos y que, por lo general, se esperaba que la mayoría de encuestados ya hubiesen culminado con el bachillerato, sin embargo, sería pertinente incluir a personas menores de edad en futuros estudios.

6.2.2 Percepción de la calidad del aire

Al realizar la investigación de la percepción de la calidad del aire por parte de los transeúntes y habitantes de la comuna 22 a través de la encuesta en un formulario de Google forms, los encuestados identificaron, como se muestra en la Figura 26, que la mayor problemática que actualmente existe en la comuna 22 es la movilidad y la infraestructura vial (56,3%) reflejando una clara necesidad de intervención en este aspecto. Sin embargo, esto también podría justificar los valores en las concentraciones de PM al haber una mayor congestión vehicular en la zona. La segunda problemática con mayor porcentaje de votación es la expansión urbanística y el deterioro de las zonas verdes (32,8%) puesto que, como anteriormente se mencionó en este estudio, hacia el sur de la ciudad se presenta el mayor fenómeno de expansión y es precisamente hacia esta zona donde actualmente se están desarrollando diversos proyectos de esta índole que generan una clara reducción en la cobertura vegetal en la comuna y que, a su vez, no permiten una limpieza o mejora en la calidad del aire.

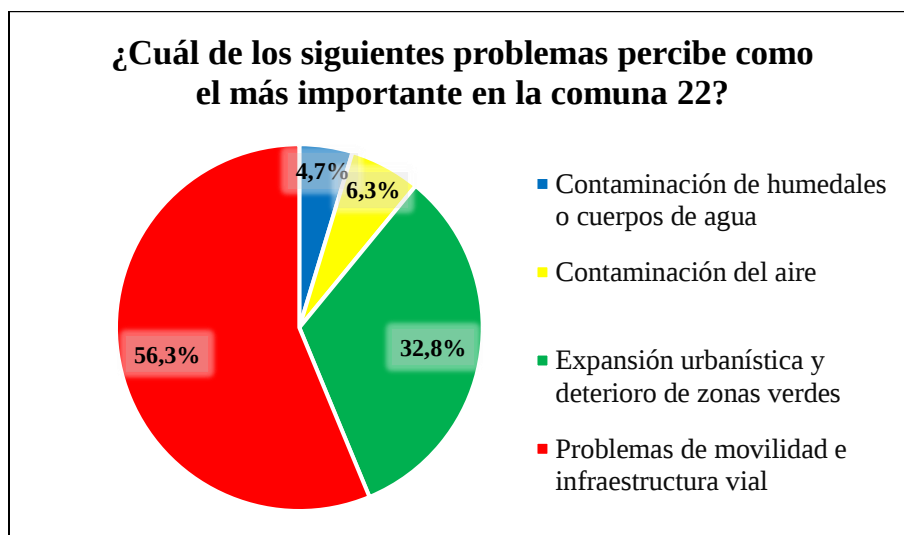


Figura 26. Problemática ambiental más importante percibida.

Fuente: Elaboración propia.

En tercer lugar, estaría contenida la contaminación del aire como la problemática más importante en la comuna 22. Sin embargo, esta problemática solo obtuvo un 6,3% en la votación, evidenciando que, aunque no se presentan problemas como el “smog” o un aumento en las concentraciones de los contaminantes atmosféricos de manera que se pueda catalogar como un evento crítico, se puede constatar que aún existe un sesgo en el conocimiento del estado de la calidad del aire, no solamente en la comuna sino en toda la ciudadanía. El último lugar lo ocupa la contaminación de los humedales o cuerpos de agua (4,7%) reflejando que la expansión urbanística hacia el sur de la ciudad también está afectando actualmente los ecosistemas acuáticos presente en la comuna.

La Figura 27 refleja la importancia de la calidad del aire para los encuestados a lo que el 90,6% respondió que es muy importante, destacando que para los habitantes y transeúntes de la comuna, la calidad del aire tiene una atención especial por parte de los encuestados al ser un recurso vital para el día a día. Por otro lado, para el 9,4% de los encuestados la calidad del aire es moderadamente importante, esto declara que al enfatizar más en esta temática, esta pequeña porción de la población podría interesarse o importarle más el estado de la calidad del aire, cabe destacar que dentro de las respuestas una opción era “no tiene importancia”, sin embargo, esta opción no tuvo ningún voto.

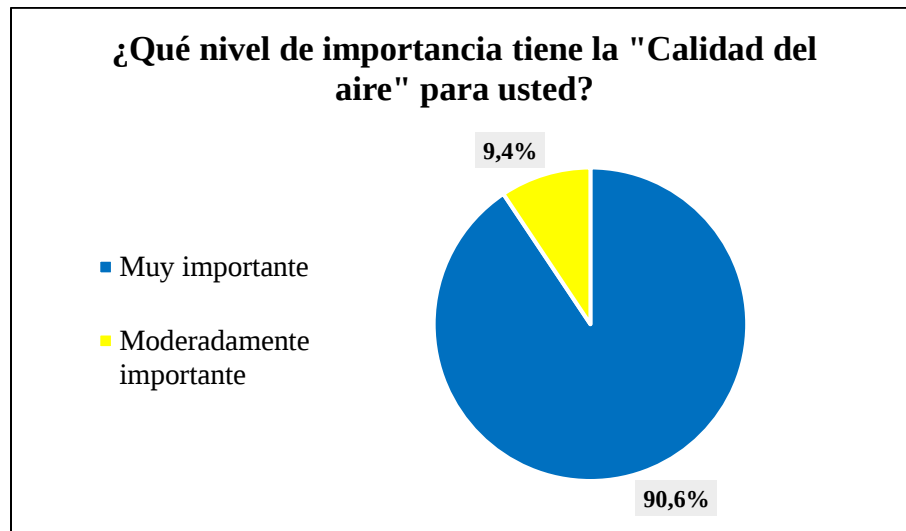


Figura 27. Nivel de importancia de la calidad del aire.

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 28 refleja los resultados obtenidos con respecto a la pregunta de calificación de la calidad del aire en la comuna 22, el 43,8% de los encuestados denota esta calidad en la comuna como buena, el 42,2% lo denota como una calidad aceptable, el 9,4% cree que la calidad del aire es excelente, mientras que solo el 4,7% piensa que la calidad del aire en la comuna es mala.

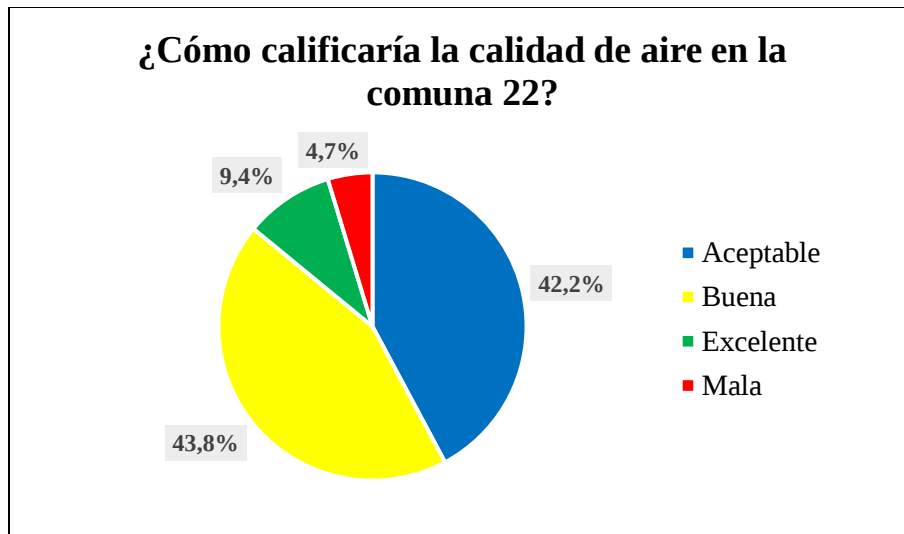


Figura 28. Calificación de la calidad del aire.

Fuente: Elaboración propia.

Estos porcentajes reflejan que más del 50% de los encuestados considera que la calidad del aire en la comuna 22 es buena demarcando en general, una buena percepción por parte de respuestas positivas que soportan este resultado, Al indagar por cuál medio de información, los encuestados consultan o se documentan con respecto a la calidad del aire, en la Figura 29 se puede ver que de las 64 personas, 30 se informan a través del internet, 14 por medio de redes sociales, al menos 9 usan aplicaciones móviles y solo 5 usan aún los periódicos, contrariamente, 20 de los 64 encuestados no utiliza ninguno de estos medios para informase sobre el estado de la calidad del aire.

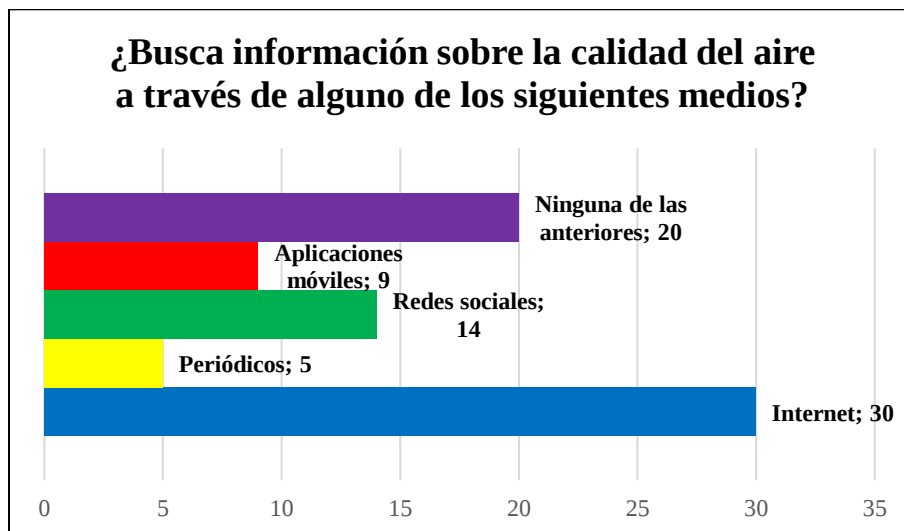


Figura 29. Medios de comunicación usados para consultar información.

Fuente: Elaboración propia.

Para las opciones de respuesta, se tuvieron en cuenta los medios más usados en la actualidad, excluyendo por ejemplo los periódicos al ser uno de los medios informáticos que ya no son tan frecuentados. En cuanto a las personas que no se informan por ninguno de estos medios, sería pertinente indagar si la información la buscan a través de otro medio o cuál podría ser un medio práctico para que puedan consultar el estado de la calidad del aire. Sin embargo, esto abre una oportunidad para otra investigación, ya que representan un número importante dentro de los encuestados.

A propósito de cuál era la fuente de contaminación en el aire que consideran con respecto a la comuna 22 como se muestra en la Figura 30, el 75% de los 64 encuestados cree que esta contaminación es por causa del parque automotor, por tanto los transeúntes y los habitantes de la comuna podrían estar conectando los problemas de movilidad en esta zona, sumado a la cantidad creciente de vehículos, concluyendo que todo esto en conjunto podría estar ocasionando un detrimento en la calidad del aire.

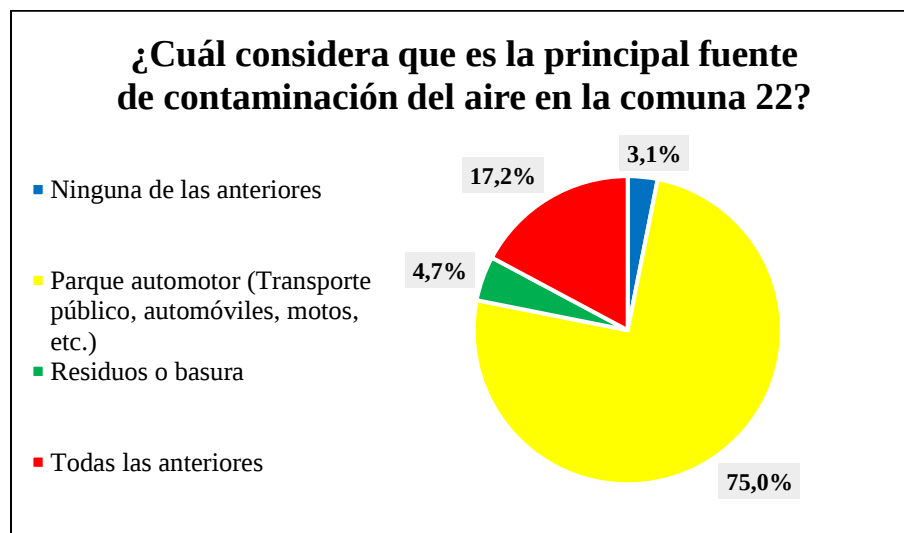


Figura 30. Principal fuente de contaminación de la calidad del aire.

Fuente: Elaboración propia.

Cabe agregar que un 17,2% considera que tanto los residuos o basura, así como el parque automotor son la principal fuente de contaminación, mientras que tanto solo el 4,7% considera que solo los residuos o basuras con la principal fuente de contaminación del aire. Finalmente el 3,1% considera que ninguna de estas categorías representa la principal fuente de contaminación del aire, conviene precisar que también se dispuso la opción de las industrias como una posible respuesta, pero, a pesar de esto, ningún encuestado reconoció esta problemática como la principal fuente de contaminación del aire en la comuna.

La Figura 31 presenta los resultados de otra de las preguntas que se les realizó a los encuestados, en la cual se pretendió examinar si creían que la calidad del aire podía afectar su salud, a lo que un

82,2% respondió que estaba totalmente de acuerdo, en otras palabras, estas personas consideran que el mal estado de la calidad del aire podría afectar negativamente su salud, mientras que, el 9,4% no está ni de acuerdo ni en desacuerdo, quizá por falta de conocimiento o información que pueda soportar su respuestas. En contraste, tan solo el 7,8% cree que la calidad del aire no repercute en el estado de salud.

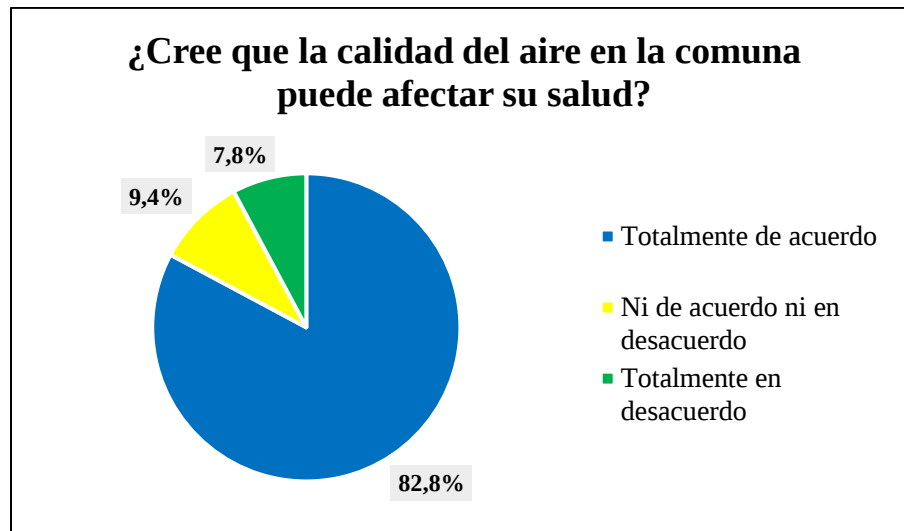


Figura 31. Creencia en la afectación de la salud por el estado de la calidad del aire.

Fuente: Elaboración propia.

De la misma manera se les consultó si han presentado alguna afección debido a la mala calidad del aire en la comuna, acorde con los resultados plasmados en la Figura 32, el 56,3% considera que no ha tenido ninguna consecuencia en la salud debido a la contaminación del aire, en lo concerniente a afecciones como irritación, tos o dificultad para respirar, el 35,9% de los encuestados considera que si ha presentado alguna de las afecciones mencionadas anteriormente debido a la mala calidad del aire.

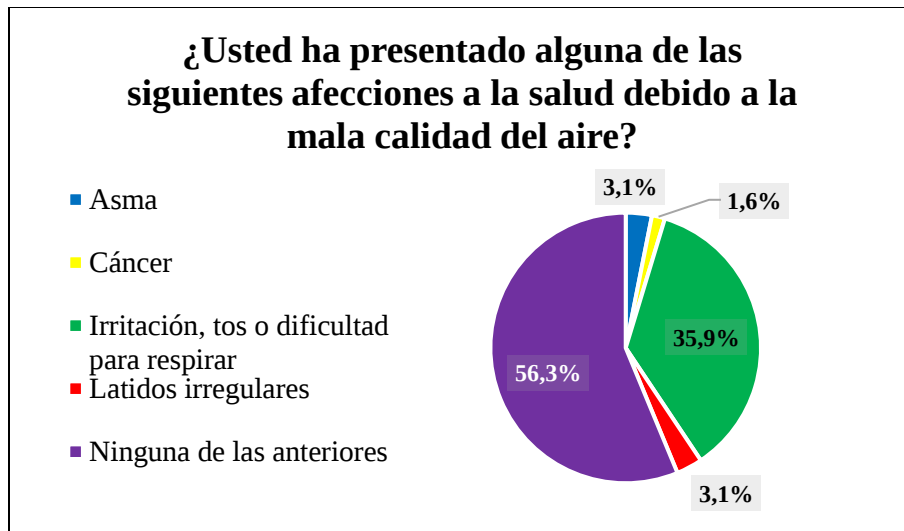


Figura 32. Afecciones a la salud debido a la mala calidad del aire.

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, el 3,1% de los encuestados considera que se le ha presentado asma o latidos irregulares en algún momento y, particularmente un 1,6% respondió que ha presentado algún tipo de cáncer a raíz de estar expuesto a la contaminación del aire en la comuna 22.

Siguiendo el cuestionario, la Figura 33 evidencia que al consultarle a los encuestados si conocen de la existencia del comité ambiental de la comuna 22, la mayoría (64,1%) respondió que tiene conocimiento sobre el comité, mientras que, más de un tercio (35,9%) de los encuestados no tienen conocimiento de este comité, siendo este un valor significativo desde el punto de vista de participación ciudadana e impacto comunicacional.

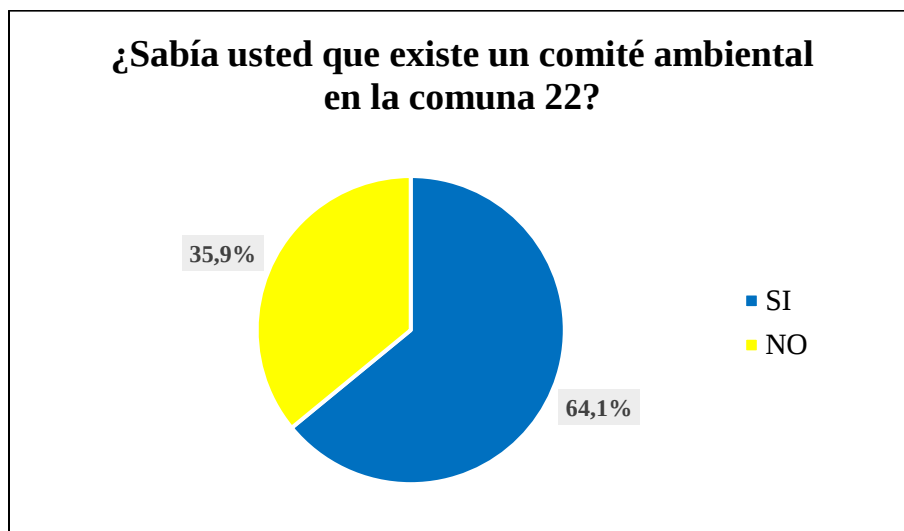


Figura 33. Conocimiento del comité ambiental de la comuna 22.

Fuente: Elaboración propia.

Aunque existe una proporción significativa de personas que manifiesta conocer el comité, el grupo que lo desconoce constituye una barrera crítica para la participación efectiva. En la medida en que no se reconoce su existencia, se dificultan el involucramiento y la vinculación de la comunidad a iniciativas locales, lo cual puede reflejar debilidades en los procesos de divulgación, baja visibilidad de actividades o una conexión limitada con los residentes. Adicionalmente, este resultado podría estar asociado a niveles reducidos de interés o apropiación territorial por parte de algunos habitantes, evidenciados en una menor disposición a informarse sobre el entorno, sus problemáticas y posibles alternativas de solución, así como en una participación limitada en espacios de colaboración tanto a escala local como urbana.

A diferencia de la anterior gráfica, el 54,7% de los encuestados desconocen de la existencia de la red de monitoreo de la calidad del aire perteneciente al OAC22 como se puede observar en la Figura 34 y aunque hay un grupo importante que sí la conoce (45,3%), el desconocimiento supera el umbral del 50%.

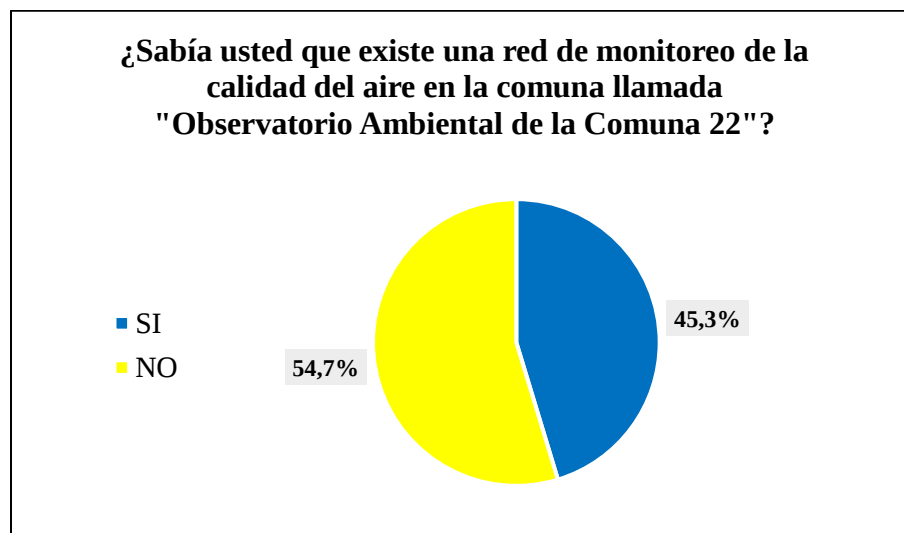


Figura 34. Conocimiento de la existencia del observatorio ambiental de la comuna 22.

Fuente: Elaboración propia.

El Observatorio Ambiental de la Comuna 22, así como la red de monitoreo de calidad del aire, representan una herramienta clave para informar, educar y generar conciencia sobre diversas temáticas ambientales en la comuna, demostrando que su bajo nivel de reconocimiento limita su impacto, afectando a su vez la legitimidad social del observatorio y la capacidad de incidir en decisiones locales.

La percepción ciudadana frente al rol participativo en la protección del aire resultó ser altamente positiva, el 68,8% de los encuestados consideran que es muy importante la participación en actividades que tengan este fin, mientras que un 26,6% siente que participar en estas actividades tiene una importancia moderada como se puede evidenciar en la Figura 35.

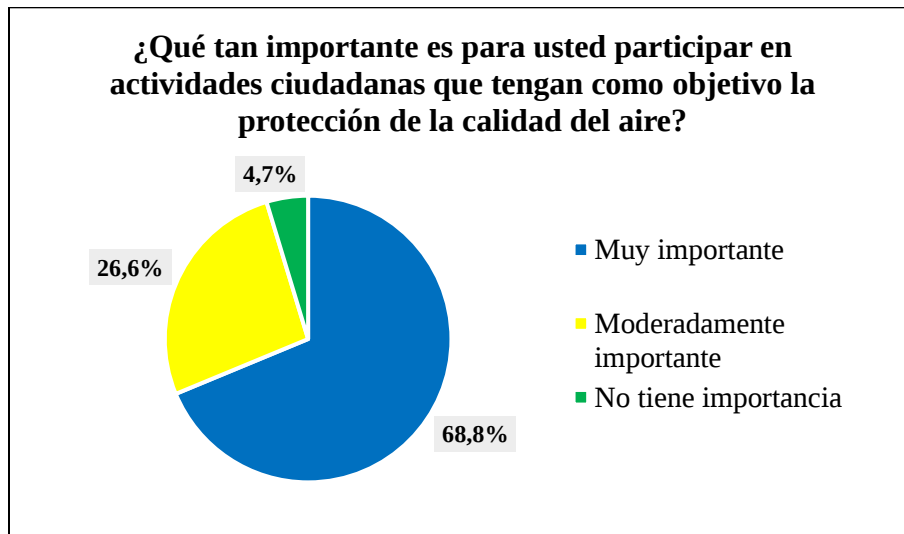


Figura 35. Importancia de la participación en actividades para el mejoramiento de la calidad del aire.

Fuente: Elaboración propia.

Solo un 4,7% minimiza la importancia de estas actividades, lo que evidencia una oportunidad real de movilización comunitaria si dicha disposición se canaliza de manera adecuada. Este resultado sugiere un alto potencial para activar estrategias de participación, en la medida en que la comunidad no solo reconoce la problemática, sino que manifiesta voluntad de involucrarse en su abordaje. No obstante, esta interpretación debe leerse considerando que el OAC22 es una iniciativa de creación reciente, por lo que su nivel de posicionamiento, visibilidad y capacidad de convocatoria aún se encuentra en consolidación y puede influir en la magnitud y estabilidad de la participación observada.

La Figura 36 muestra la respuesta de los encuestados frente a la participación en acciones que contribuyan a mejorar la calidad del aire en la comuna 22, a lo que el 90,6% respondió afirmativamente indicando un alto nivel de compromiso ciudadano, manifestando a su vez una de las cifras más positivas en las respuestas del cuestionario basadas no solo en la percepción sino también en la disposición para actuar.

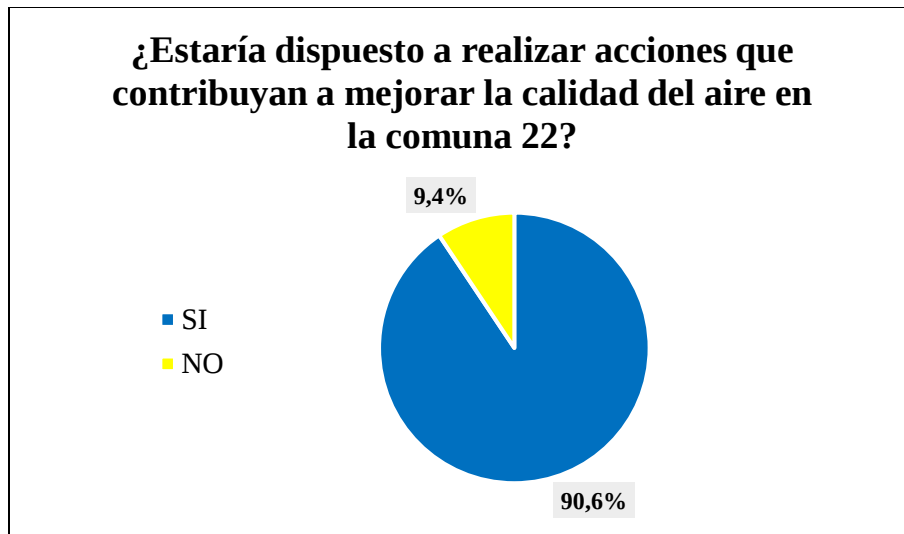


Figura 36. Disposición para participar en acciones que mejoren la calidad del aire.

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, el hecho de que aun haya un 9,4% con una respuesta negativa, también sugiere que hay un pequeño grupo de ciudadanos al que hay que convencer, facilitándole la información para empezar a desarrollar una motivación y orientación hacia canales reales de acción.

En la Figura 37, la educación y conciencia ambiental resultó ser la acción en la que los encuestados participarían en su mayoría, ya que 38 personas eligieron esta acción, reforzando que las personas quieren comprender el porqué y el cómo sus acciones repercuten en la calidad del aire. La participación ciudadana resultó ser clave con 31 respuestas, indicando que las personas prefieren trabajar colectivamente y no actuar de manera solitaria.

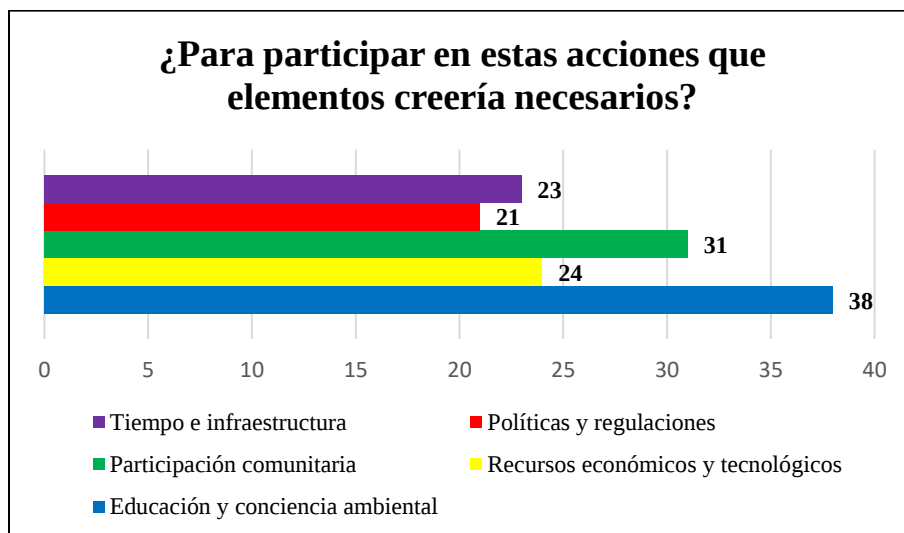


Figura 37. Elementos necesarios para participar en las acciones.

Fuente: Elaboración propia.

También indican que el factor económico/tecnológico es relevante con 24 respuestas, sugiriendo que algunas barreras prácticas pueden dificultar la participación, asegurando que con estos recursos se podrían alcanzar mayores logros ambientales, ya que no basta solo con convocar a los ciudadanos, sino que también se deben habilitar condiciones estructurales, educativas y tecnológicas. Otro punto positivo es que las respuestas no se centraron solo en recursos materiales, siendo esto positivo para la transformación cultural y comunitaria como una prioridad para la gente.

Por último, al escrutar en cuál o cuáles de las actividades promovidas por el OAC22 participarían activamente los encuestados (Figura 38), la actividad más atractiva fue el desarrollo de proyectos, políticas e iniciativas con 28 menciones, indicando una inclinación por la acción concreta y el involucramiento estratégico. Actividades formativas y participativas como capacitaciones, talleres, foros y jornadas movilidad sostenible presentaron un interés equilibrado (23 y 21 respuestas).

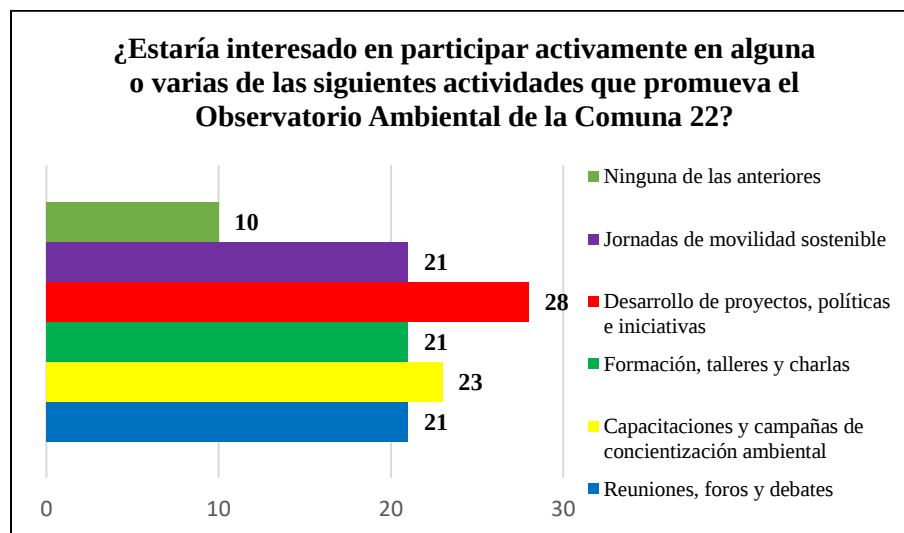


Figura 38. Interés para participar en las actividades promovidas por el OAC22.

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, solo 10 personas no estarían interesadas en participar en ninguna actividad, confirmando una alta disposición comunitaria a participar activamente, esto valida que la comunidad podría estar más empoderada de lo que parece, aun así, brindado los canales y oportunidades correctas, el Observatorio Ambiental de la Comuna 22 tiene una gran ventana de oportunidad para fortalecerse y fortalecer a la comunidad como actores clave en el territorio.

La percepción de la calidad del aire influye en las intenciones y acciones de las personas frente a la prevención de la exposición a la contaminación del aire, ya que están influenciadas por la manera en que se percatan de los riesgos que representan con relación a la salud de cada individuo (Bahrami et al., 2024). Al realizar el cuestionario de percepción de calidad del aire en la comuna 22 del Distrito de Santiago de Cali, se esperaba realizar un total de 100 encuestas entre habitantes

y transeúntes habituales de la comuna. Sin embargo, se lograron realizar 64 encuestas con una muestra que varía tanto en edad, genero, estudios obtenidos y frecuencia o permanencia en la comuna.

El análisis de esta investigación se comparó con estudios realizados en la ciudad de Bogotá y municipios aledaños, Colombia (Mantilla et al., 2021), la colonia de Tonalá, Jalisco, México (Martínez-Abarca et al., 2022) y dos ciudades europeas (Salimbene et al., 2024), estos artículos de investigación ofrecen una perspectiva más amplia acerca de cómo otras comunidades en el mundo comprenden la calidad del aire y cómo enfrentan los diversos obstáculos y retos que pueden surgir a raíz de este tema.

En el primer artículo se encuestaron personas habitantes tanto de la ciudad de Bogotá como de los municipios aledaños de la ciudad, diversificando las respuestas de modo que el 42% correspondían a estudiantes y el 36% a trabajadores tanto del sector público como del privado, destacando que la ciudadanía posee una alta percepción de la mala calidad del aire, pero al mismo tiempo tienen una baja acción informativa o preventiva frente al problema. En el contexto mexicano (Martínez-Abarca et al., 2022) decidieron investigar las molestias y los problemas asociados a la salud que presentaban los habitantes de esta comunidad expuestos al humo de las ladrilleras de la zona. En este caso, las personas creen que mientras permanecen en casa presentan afectaciones a la salud debido a la mala calidad del aire y señalando una falta de acción por parte de las autoridades ambientales. Mientras que (Salimbene et al., 2024) investigaron la percepción de la calidad del aire en las ciudades de Turín y Dublín, concentrándose en una población estratificada de residentes mayores de 18 años, aunque el estudio demuestra diferencias entre las percepciones de los habitantes de ambas ciudades, destaca que tanto en Turín como Dublín los encuestados coinciden en que el transporte público es la principal fuente de contaminación y aunque la población generalmente está bien informada de las fuentes de contaminación, especialmente en Turín existe una resistencia estructural al cambio y cierta desconfianza institucional.

Todos los estudios anteriormente mencionados demuestran algunas semejanzas y diferencias con los resultados hallados en el caso de la comuna 22 del DSC, ampliando el panorama y la discusión para potenciar la comprensión de la problemática situada en esta comuna. Por ejemplo, el 75% de los habitantes de la comuna 22 del DSC creen que la principal fuente de contaminación del aire en esta zona de la ciudad se debe al parque automotor, resaltando que la comuna 22 concentra una proporción significativa de instituciones educativas escolares, técnicas y universitarias del DSC, lo que genera una afluencia diaria considerable de población flotante. A esta dinámica se suman los desplazamientos asociados a la asistencia a centros deportivos y recreativos, así como el tránsito constante de personas que se movilizan hacia y desde municipios vecinos. Estos flujos incrementan de manera notable la presión sobre la movilidad, el uso del espacio urbano y las actividades cotidianas del territorio. Además, este hallazgo es análogo a lo que manifiestan los habitantes de la ciudad de Turín y de Dublín, ya que el 58,3% y el 66,6%, respectivamente, también creen que esta es la principal fuente de contaminación. Sin embargo, a pesar de esta creencia, en el caso de Bogotá y en los municipios aledaños, los ciudadanos reconocen que existe un problema de contaminación del aire, pero el 65% nunca consulta información técnica relacionada con la calidad del aire, en contraste, en la comuna 22 del DSC, el 20% de los encuestados no utiliza ningún medio para informarse con relación a la calidad del aire en la zona.

Por su parte, la encuesta realizada en la comuna 22 del DSC demostró que en general, se tiene una buena percepción de la calidad del aire por parte de los habitantes y transeúntes, ya que el 9,4% cree que es excelente y el 43,8% percibe una buena calidad del aire. Sin embargo, al consultar la encuesta de percepción ciudadana, realizada por el grupo Cali Cómo Vamos, demostró que a septiembre del 2024, el 35% de los caleños se encuentran insatisfechos por la calidad del aire en la ciudad, esta última percepción se alinea con los resultados expuestos en Tonalá donde los encuestados consideran que la calidad del aire va de regular a mala, estos resultados se alinean con los expuestos por los habitantes de Turín donde el 42% reconoce que la calidad del aire en esta ciudad es mala y el 36% la percibe como peligrosa, en contraste, el 72,6% de los encuestados en Dublín afirmaron que respiran buen aire, este último resultado podría alinearse con la percepción en la comuna 22 del DSC.

Finalmente, en cuanto a los datos socio-demográficos, en la comuna 22 del DSC al tratarse de una comuna donde predomina el estrato social 6, se asumió que todos los encuestados pertenecen a este, ya que al no habitar directamente la comuna, hacen parte de instituciones educativas o empresas del sector que se catalogan dentro del mismo estrato, mientras que en Bogotá y sus municipios aledaños, la participación en las encuestas por parte de personas del estrato 6 fue muy baja. En la comuna 22 del DSC tan solo el 35,9% considera que ha presentado irritación, tos o dificultad para respirar a raíz de la mala calidad del aire, mientras que en Tonalá, el 47% de los encuestados cree que ha tenido molestias respiratorias como irritación en la nariz, irritación en la garganta, estornudos y dificultad para respirar en consecuencia de la mala calidad del aire. Al mismo tiempo, en la comuna 22 del DSC, el 54,7% de los encuestados posee un posgrado o especializaciones, mientras que en la ciudad de Dublín y Turín las personas encuestadas con un título universitario representaron el 41,9% y el 59,1%, respectivamente.

6.2.3 Identificación de los elementos de gobernanza

A partir de los resultados obtenidos, se identifican diversos elementos clave asociados a la gobernanza de la calidad del aire en la Comuna 22. En primer lugar, se evidencia una alta disposición ciudadana a participar activamente en acciones orientadas a mejorar la calidad del aire, lo que refleja un potencial significativo para fortalecer mecanismos de participación ambiental y corresponsabilidad. Asimismo, la comunidad reconoce la necesidad de condiciones habilitantes como la educación y conciencia ambiental, la participación comunitaria y los recursos económicos y tecnológicos, aspectos que son fundamentales para la construcción de capacidades colectivas y sostenibilidad de los procesos participativos. La percepción general sobre los problemas ambientales de la comuna —especialmente la expansión urbanística descontrolada y la contaminación del aire—, así como la preocupación por sus efectos sobre la salud, constituyen insumos clave para la gobernanza ambiental territorial, al posicionar el aire como un bien común y un tema prioritario en la agenda local. No obstante, se observa una débil apropiación institucional por parte de la ciudadanía, expresada en el desconocimiento parcial de estructuras como el comité ambiental local y el Observatorio Ambiental, lo cual señala un desafío en materia de visibilidad institucional y articulación entre actores. Finalmente, el interés ciudadano en actividades como el desarrollo de políticas e iniciativas, capacitaciones, foros y jornadas sostenibles, reafirma la existencia de condiciones favorables para avanzar hacia una gobernanza colaborativa, centrada en

el empoderamiento comunitario, la acción colectiva y la integración de saberes técnicos y sociales en torno a la gestión de la calidad del aire.

6.3 Estrategias de gobernanza de calidad del aire aplicables a la red ciudadana del Observatorio Ambiental de la Comuna 22 de Santiago de Cali.

Para la formulación de las estrategias de gobernanza de calidad del aire que puedan ser aplicables al OAC22, se tuvieron en cuenta las respuestas de la encuesta de percepción diligenciada por habitantes y transeúntes habituales en la comuna, al mismo tiempo, se incluyeron aspectos del diagnóstico de la red ciudadana que trabaja por medio del OAC22 que puedan afectar directamente o limitar el impacto de la gobernanza promovida por el comité ambiental de la comuna 22, así como también la participación ciudadana en estos espacios colectivos de la sociedad civil.

6.3.1 Matriz DOFA

A continuación, en la Tabla 8 se muestra el análisis DOFA construido y los resultados que se obtuvieron al integrar todos los factores anteriormente mencionados para establecer las estrategias que contribuyan a fortalecer la gobernanza de la calidad del aire en la comuna 22:

Tabla 8. Matriz DOFA aplicada a la red ciudadana Observatorio Ambiental de la Comuna 22.

MATRIZ DOFA		
	FORTALEZAS	DEBILIDADES
Factores Internos	- F1: Alta disposición ciudadana para participar en actividades que mejoren la calidad del aire. - F2: Reconocimiento del comité ambiental de la comuna 22 por parte de los encuestados. - F3: Buen nivel educativo de los ciudadanos involucrados. - F4: Articulación inicial entre el OAC22 con el DAGMA, la academia y sectores privados. - F5: Reconocimiento de la calidad del aire como una temática importante para los encuestados.	- D1: Más de la mitad de los encuestados no tienen conocimiento de la existencia del OAC22. - D2: Falta de estrategias de comunicación y difusión sobre la red y sus actividades. - D3: Ausencia de procesos sistemáticos de rendición de cuentas o retroalimentación con la comunidad. - D4: Falta de claridad sobre los roles y responsabilidades dentro de la red. - D5: Bajo uso e interés en canales digitales por parte de la comunidad para informarse sobre la calidad del aire.
	OPORTUNIDADES	AMENAZAS
Factores Externos	- O1: Marco institucional nacional que promueve la gobernanza colaborativa en calidad del aire. - O2: Interés del Ministerio de Ambiente en fortalecer la	- A1: Escasa confianza institucional que puede dificultar el involucramiento sostenido de actores clave. - A2: Baja sostenibilidad financiera o presupuestal de

	participación ciudadana e investigación aplicada. • O3: Posibilidad de articularse con espacios como los COTSA, mesas regionales de calidad del aire o universidades. • O4: Incremento en la demanda pública por información clara, accesible y útil para la toma de acciones.	iniciativas ciudadanas sin respaldo institucional fuerte. • A3: Cambios políticos locales que puedan debilitar los acuerdos interinstitucionales ya existentes. • A4: Riesgo de desarticulación entre actores (gobierno-academia-comunidad-sector privado).
--	---	--

Fuente: Elaboración propia.

6.3.2 Análisis de las estrategias

Para lograr un análisis adecuado y efectivo antes de plantear las estrategias de gobernanza que podrían ayudar a mitigar las debilidades y amenazas del Observatorio Ambiental de la Comuna 22 del DSC y fortalecer la participación de todos los actores involucrados, también se realizó una entrevista vía meet al coordinador actual del OAC22, el cual fue elegido por los integrantes del Comité Ambiental de la Comuna 22, representando al comité ante el SIGAC – Sistema de Gestión Ambiental Comunitario. Este sistema fue creado por la Alcaldía de Santiago de Cali a través del Decreto No. 0542 de 2003.

Este sistema resulta ser parte del Sistema De Gestión Ambiental Municipal – SIGAM, el SIGAC es concebido como una organización comunitaria capaz de democratizar y ampliar la gestión ambiental en el municipio, brindando un espacio de concertación y participación ciudadana activa, así como las herramientas indispensables para mitigar, resolver y prevenir los problemas ambientales a través de decisiones conjuntas.

El Sistema de Gestión Ambiental Comunitario – SIGAC es conformado por el Concejo Ambiental Comunitario Municipal – C.A.C.M. y en segundo lugar por los Comités Ambientales Comunitarios – C.A.C., así, entonces, el Comité Ambiental de la Comuna 22 hace parte actualmente de esta mesa técnica, estableciendo y desarrollando interacciones no solo con los demás comités de las demás comunas de la ciudad, sino también con representantes del C.A.C.M.

El Comité Ambiental Comunitario puede ser conformado por habitantes, trabajadores o estudiantes que pertenezcan a las Comisiones Ambientales Territoriales de los diferentes barrios con la condición de que resida, estudie o trabaje en el barrio de la comuna en la cual ha realizado su gestión ambiental comunitaria por como mínimo un año. La junta directiva que representa el comité ante la mesa técnica debe estar compuesto por siete integrantes de la siguiente manera:

1. Un/a Coordinador/a general
2. Un/a Coordinador/a operativo
3. Un/a Secretario/a
4. Un/a Tesorero/a
5. El/a responsable de procesos de cultura ambiental y comunicación
6. El/a responsable de organización, movilización y gestión de conflictos ambientales
7. El/a responsable de gestión de proyectos ambientales

Entonces, así es como actualmente está organizado el Comité Ambiental de la Comuna 22, ya que en el año 2026 se realizarán nuevamente elecciones donde se elegirán nuevos integrantes para ocupar estos cargos y se les designará sus respectivos roles y responsabilidades. Sin embargo, al ocupar estos lugares dentro del comité de manera voluntaria, actualmente se encuentran ausencias y, además, no siempre se cumple con las funciones, lo cual genera dificultades adicionales para poder hacer una debida gestión a través del OAC22 y, en consecuencia, no lograr tener una gobernanza robusta a través del observatorio.

Sin embargo, el comité presentó una estrategia de gobernanza para articular las organizaciones ambientales ciudadanas con entidades públicas del DSC y a nivel departamental en el año 2024, pretendiendo emprender acciones frente a las autoridades en el territorio y que estas acciones tuviesen lugar en los planes, contratos, estudios, estrategias de educación ambiental e intervención sobre el territorio, entre otras. Lamentablemente este plan no tuvo mayor repercusión, ya que muchas veces la participación ciudadana se reduce solamente a la socialización, sin permitir que la comunidad pueda tomar acción, opinión y participación en las decisiones que se toman. Teniendo en cuenta el contexto anterior, se proponen las estrategias construidas con base a la matriz DOFA definida en la Tabla 7, enfocadas en la gobernanza de la calidad del aire y basadas en el modelo de la gobernanza del aire para Colombia.

Estrategia 1. Utilizar el alto nivel educativo y la disposición de la comunidad para participar e integrarse en comités ciudadanos que tengan como objetivo el medio ambiente y, particularmente en este caso, la calidad del aire, para que así finalmente estos comités puedan articularse con las mesas locales y regionales de calidad del aire, transformándose en un actor fundamental en la toma de decisiones tanto a nivel local, municipal, regional, etc. Esto se hace importante, ya que la participación ciudadana es una herramienta que facilita la interacción constante entre los actores sociales, como el Estado y los grupos de la sociedad civil, más allá de los periodos electorales. Esta interacción fortalece la democracia, permite abordar asuntos de interés colectivo y visibiliza necesidades que el Estado por sí solo no identifica, dando la oportunidad a que la ciudadanía sea coproductora de acciones que la benefician (Giraldo Rodríguez, 2021).

Esta participación podría efectuarse a través de los espacios de articulación siguiendo los lineamientos del Conpes 3943 del 2018 y la “Estrategia Nacional de Calidad del Aire”, los cuales buscan el fortalecimiento de la gobernanza de la calidad del aire a través de mecanismos de participación ciudadana y, a su vez, articulando otros sectores como los académicos y privados para la formulación de políticas públicas (MinAmbiente, 2021).

Algunos de los espacios de articulación existentes para mejorar la gestión de la calidad del aire en el país son:

- **Comisión Técnica Nacional Intersectorial para la Salud Ambiental – Conasa:** Esta mesa técnica se creó a través del Decreto 2972 de 2010 teniendo como función principal articular a las entidades que hacen parte de la comisión en diferentes áreas temáticas de salud ambiental, así como promover la coordinación entre las políticas y las estrategias de ambiente y salud. A su vez, esta comisión cuenta con una mesa técnica específica en aire y salud, la cual es de interés particular para el modelo de gobernanza. La mesa técnica de aire y salud permite crear diálogos para la socialización, discusión, gestión e implementación de acciones enfocadas en determinantes sociales y ambientales de la salud acompañadas por el conocimiento técnico y la voluntad política de los diferentes sectores considerados como actores relevantes.
- **Consejos Territoriales de Salud Ambiental – Cotsa:** Estos espacios buscan tomar decisiones, mejorar la gestión y procuran la concertación intersectorial, abordando técnicamente los determinantes sociales y ambientales que afectan la calidad de vida y salud de la población, hasta el 2016 habían conformados 41 consejos territoriales de salud ambiental y en relación con las mesas técnicas conformadas por los consejos territoriales de salud ambiental, 32 son principalmente de aire y salud.
- **Mesas de calidad del aire de las ciudades y regiones:** El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible conformó mesas de trabajo en zonas del país donde la contaminación atmosférica se extiende más allá de la jurisdicción de la autoridad ambiental requiriendo la intervención articulada de actores tanto de orden nacional, regional y local, actualmente existe una mesa para Cali-región que hace posible este diálogo e intervención, desarrollando y posicionando espacios técnicos involucrando la participación de las instituciones de orden nacional, regional y local.
- **Conferencia Internacional de Calidad del Aire y Salud Pública – Casap:** Esta conferencia es un espacio donde se han articulado investigadores, el gobierno y la ciudadanía en general, el cual es realizado cada dos años, convirtiéndose en un espacio referente para los profesionales en temas de calidad del aire, permitiendo compartir el conocimiento y la tecnología que los participantes exponen para la mejora de la calidad del aire, la sostenibilidad y conservación de recursos.

Estos espacios entonces permitirían fortalecer la alianza entre el OAC22 y el comité ambiental de la comuna 22 con distintas instituciones públicas, privadas y universitarias, ya que permiten la participación en los espacios académicos y técnicos decretados por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y, por otro lado, brindando la oportunidad para que surja la posibilidad de investigaciones colaborativas con la ciencia ciudadana.

Estrategia 2. Diseñar e implementar una estrategia de comunicación comunitaria clara y masiva para aumentar el reconocimiento del OAC22 y sus funciones, aprovechando los lineamientos del modelo nacional de gobernanza, apoyándose en el reconocimiento del comité ambiental de la comuna 22 y promoviendo procesos de sensibilización comunitaria que respondan al interés de los ciudadanos por información útil y accesible.

La estrategia de comunicación a su vez podría ser complementada promoviendo talleres presenciales y virtuales para mejorar el acceso y uso de plataformas digitales que brinden información sobre la calidad del aire, apoyándose en las universidades e instituciones aliadas. Estas estrategias ya son usadas en el contexto colombiano, por ejemplo, en 2023 en el informe del PIGECA – Plan de Gestión Integral de Calidad del Aire del área metropolitana del Valle de Aburrá, se realizó una encuesta con una pregunta abierta sobre percepción en la cual se les consultó a los encuestados qué harían para mejorar la calidad del aire, a través de diferentes canales informativos y posteriormente los resultados fueron analizados y socializados en un taller, esto permitió expandir utilizar los medios de comunicación para dar a conocer que actualmente se están realizando acciones para el mejoramiento de la calidad del aire por parte de diversos actores que están involucrados en una mesa técnica regional y permitiendo la interacción con la ciudadanía que actualmente se interesa por esta temática (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2023).

Mejorar la distribución de la información tanto en el comité ambiental de la comuna 22, así como en el OAC22 permitirá que se desarrollen capacidades que terminen siendo aspectos clave para lograr el empoderamiento de la ciudadanía, lo cual impulsa su participación activa en la exigencia de acciones que mejoren la calidad del aire en las zonas urbanas y gracias al papel activo y el enlace con la academia quien es el generador de información, se logre que la ciudadanía pueda ampliar su entendimiento sobre la problemática (Quirama-Aguilar et al., 2021).

Estrategia 3. Fortalecer la legitimidad y sostenibilidad del OAC22 mediante la creación de mecanismos comunitarios de veeduría participativa y protocolos de rendición de cuentas periódicos, soportados en la alta disposición ciudadana a participar y en boletines informativos (digitales e impresos), con el fin de mitigar la desconfianza institucional, prevenir la desarticulación entre actores y garantizar la continuidad en la toma de decisiones sobre calidad del aire.

Esta estrategia se propone para diseñar e implementar un sistema participativo de seguimiento ciudadano que integre tres componentes clave:

1. Veeduría comunitaria ambiental que esté conformada por habitantes voluntarios capacitados y con experiencia en seguimientos a acciones de la red.
2. Protocolos de rendición de cuentas periódicamente ya sea semestral o trimestral de manera presencial y/o virtual para facilitar la participación de toda la comunidad.
3. Boletines informativos comunitarios que pueden ser digitales o físicos con datos relevantes sobre la calidad del aire, acciones realizadas y decisiones tomadas.

Fundamentándose no solo en la alta disposición de los ciudadanos a participar, sino que también en el reconocimiento del comité ambiental de la comuna 22 y la necesidad de fortalecer la apropiación comunitaria del OAC22, respondiendo, además, a las recomendaciones del modelo nacional de gobernanza del aire, enseñando transparencia, empoderamiento y rendición de cuentas como pilares de una gestión ambiental efectiva.

No obstante, para que su implementación sea efectiva, es necesario que venga acompañada de ciertos requisitos, como la descentralización en la toma de decisiones. Esto permitiría que cada territorio, considerando sus particularidades económicas, sociales y ecológicas, determine el tipo de desarrollo que mejor se ajusta a sus condiciones locales y regionales (Delgado et al., 2007).

De esta manera, los actores clave como el Comité Ambiental de la Comuna 22, DAGMA, universidades, líderes comunitarios, ciudadanía interesada, entre otros, podrán tener una participación y veeduría más activas de una forma transversal que permitirá un mayor empoderamiento sobre la calidad del aire y, para lograr esto, también se proponen estos medios:

- Formularios de inscripción voluntaria para la veeduría.
- Manuales sobre cómo leer y entender datos de la calidad del aire de una forma sencilla y que permita una fácil comprensión del temario.
- Una plantilla estandarizada para los boletines.
- Publicaciones tanto en la página web del OAC22 y en puntos físicos como universidades, parques o centros comunitarios.

Esto podría fundamentarse con un estudio realizado en el continente asiático donde una encuesta aplicada en Singapur exploró cómo las personas perciben el riesgo asociado a la contaminación por neblina, causada principalmente por incendios forestales. Los hallazgos mostraron que factores como la exposición a los medios de comunicación, las conversaciones con otras personas y el nivel de conocimiento influyen significativamente en la forma en que los individuos entienden ese riesgo

y modifican su disposición a tomar medidas preventivas. Estos resultados respaldan la importancia de las políticas de salud pública orientadas a sensibilizar a la población sobre la contaminación del aire y promover conductas preventivas (Bahrami et al., 2024).

Pero esto solo es posible si se realiza este trabajo por medio de las veedurías que según la Ley 850 de 2003 (Congreso de Colombia, 2003), realizan un seguimiento tanto anticipado como posterior a la gestión pública, formulando recomendaciones por escrito y de manera oportuna a las entidades responsables de ejecutar programas, proyectos o contratos, así como a los entes de control del Estado, con el propósito de optimizar la eficiencia institucional y el desempeño de los servidores públicos.

7. CONCLUSIONES

La calidad del aire emerge como un componente ambiental prioritario en la percepción ciudadana de la Comuna 22 de Santiago de Cali donde más del 90% de los encuestados reconocen su importancia. Este hallazgo refuerza el potencial de articular procesos de gobernanza ambiental sustentados en la participación de la comunidad como mecanismo legítimo para incidir en la gestión pública local del recurso aire.

La débil apropiación y el bajo nivel de conocimiento sobre el Observatorio Ambiental de la Comuna 22 (OAC22) a pesar de la alta disposición a participar de los habitantes, evidencian una desconexión entre los canales institucionales de gestión ambiental y los ciudadanos. Esto pone de manifiesto la necesidad de fortalecer la visibilidad, legitimidad y capacidad operativa de la red ciudadana del observatorio como actor clave en el ecosistema local de gobernanza del aire.

Los procesos de gobernanza del aire en el contexto del OAC22 se desarrollan aún de manera incipiente y no cuentan con mecanismos formales de rendición de cuentas, comunicación estratégica ni veeduría estructurada, lo que limita su capacidad de generar impactos sostenidos en la toma de decisiones y el control social sobre las políticas ambientales locales.

El modelo nacional de gobernanza del aire, propuesto por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, ofrece un marco conceptual y operativo aplicable al ámbito local, ya que destaca la descentralización, la cogestión, la transparencia y la rendición de cuentas como pilares fundamentales para el fortalecimiento de la gestión de la calidad del aire. Adaptar estos lineamientos al entorno específico de la Comuna 22 representa una oportunidad concreta para consolidar una gobernanza más efectiva y participativa.

La articulación interinstitucional entre actores locales como el DAGMA, el comité ambiental, instituciones académicas y organizaciones ciudadanas debe pasar de ser eventual a convertirse en una estructura de gobernanza permanente con protocolos claros, canales de coordinación y

distribución de responsabilidades. Ello permitiría consolidar una red operativa que potencie la toma de decisiones informadas, integradas y con enfoque territorial.

El diseño e implementación de estrategias como veedurías ciudadanas ambientales, boletines comunitarios de seguimiento y espacios de deliberación públicos podrían constituirse en mecanismos eficaces para cerrar brechas de confianza institucional, mejorar la transparencia y promover el empoderamiento ciudadano en torno a la calidad del aire, alineándose con los principios de gobernanza efectiva, eficiente y colaborativa.

El fortalecimiento de la red ciudadana del OAC22 no debe limitarse a la mejora técnica del monitoreo, sino que debe ampliarse hacia una gobernanza ambiental transformadora, basada en procesos educativos, políticos y sociales que reconozcan a la ciudadanía como actor corresponsable en la gestión ambiental urbana, contribuyendo así al desarrollo de políticas públicas más legítimas, inclusivas y sostenibles.

Finalmente, Este trabajo podría constituir el inicio de nuevas investigaciones o estudios a futuro que integren el componente social con la ingeniería permitiendo diseñar más estrategias o llegar a instancias mayores como políticas públicas que contribuyan a mejorar la calidad del aire, transformar la cultura ciudadana y reducir los riesgos a la salud que genera esta problemática en entornos urbanos.

8. RECOMENDACIONES

Diseñar e implementar una estrategia de comunicación socioambiental diferenciada que permita aumentar el nivel de conocimiento, apropiación y confianza de los ciudadanos en el Observatorio Ambiental de la Comuna 22 (OAC22) con enfoque territorial y uso de medios accesibles (impresos, digitales, comunitarios). Esta estrategia debe recoger los intereses, lenguajes y prácticas culturales del territorio, fortaleciendo la percepción del OAC22 como herramienta legítima de acción colectiva.

Establecer un protocolo de articulación interinstitucional permanente que defina roles, responsabilidades, canales de comunicación y mecanismos de seguimiento entre los actores vinculados a la gobernanza del aire (DAGMA, comité ambiental, universidades, comunidad organizada). Este protocolo debe ser elaborado de forma participativa y validado por todos los actores, a fin de consolidar una red operativa funcional, eficiente y transparente.

Adaptar los principios del modelo nacional de gobernanza del aire al contexto local de la Comuna 22, priorizando la cogestión, la descentralización en la toma de decisiones, la transparencia y el enfoque por capacidades. Esto implica incluir procesos de formación técnica y política en gobernanza ambiental para actores ciudadanos y líderes comunitarios.

Desarrollar un plan piloto de gobernanza colaborativa en el que el OAC22 lidere la gestión de alertas tempranas, jornadas de medición participativa y acciones educativas sobre calidad del aire. Este plan debe tener una duración definida (por ejemplo, 12 meses), indicadores de seguimiento, acompañamiento institucional, y cierre con evaluación participativa de resultados.

Iniciar la formalización de un compromiso institucional y presupuestal por parte de una o varias entidades del orden municipal, de manera que se garantice la sostenibilidad operativa del Observatorio. El funcionamiento efectivo de esta iniciativa no depende únicamente de infraestructura y recursos físicos, sino también de financiación estable y de capacidad técnica especializada para asegurar el mantenimiento de la red, la gestión de los datos, su análisis e interpretación, y la comunicación oportuna de los resultados a la comunidad y a los tomadores de decisión, resaltando su significado para la gestión local de la calidad del aire.

Por último, promover la inclusión de la red ciudadana del OAC22 en instancias oficiales de toma de decisiones, como el Consejo Territorial de Planeación, el Comité Técnico de Calidad del Aire del DAGMA o las mesas ambientales locales, de modo que se institucionalice la participación ciudadana y se reconozca su rol dentro del sistema de gobernanza ambiental urbano.

REFERENCIAS

Alloatti, M. N. (2014). Una discusión sobre la técnica de bola de nieve a partir de la experiencia de investigación en migraciones internacionales.

Asghar, K., Ali, A., Tabassum, A., Nadeem, S. G., Hakim, S. T., Amin, M.,...Hussain, M. (2024). Assessment of particulate matter (PM) in ambient air of different settings and its associated health risk in Haripur city, Pakistan. *Brazilian Journal of Biology*, 84 C7 - e256190. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.256190>

Bachtar, V. S., Afrianita, R., & Aziz, R. (2025). Investigation of the Spatiotemporal Distribution of PM10, PM2.5, and PM1 from Motor Vehicles in Roadside Environments: The Case Study of Padang City, Indonesia. *Engineering, Technology and Applied Science Research*, 15(1), 19646-19654. <https://doi.org/10.48084/etasr.9281>

Bahrami, Z., Satomi, S., Zhesi, Y., Monali, M., Paoi, K., Tomohiro, U.,...and Ueda, K. (2024). The perception of air pollution and its health risk: a scoping review of measures and methods. *Global Health Action*, 17(1), 2370100. <https://doi.org/10.1080/16549716.2024.2370100>

Barot, V., & Kapadia, V. (2020). *Air Quality Monitoring Systems using IoT: A Review*. <https://doi.org/10.1109/ComPE49325.2020.9200053>

Cali, A. d. S. d. (2012). *Informe de Diseño y Operación del Sistema de Vigilancia de la Calidad del Aire*. Retrieved 15 de febrero from <https://www.cali.gov.co/dagma/publicaciones/135573/estudios-e-investigaciones-sobre-la-calidad-del-aire/genPagdoc2133=4>

Cali, A. d. S. d. (2023). *Cali en cifras 2023*. Retrieved 20 de febrero from <https://www.cali.gov.co/loader.php?lServicio=Tools2&lTipo=descargas&lFuncion=descargar&idFile=80653>

Colombia, G. d. (2023). *Gestor normativo*. Retrieved 08 de marzo from <https://www.funcionpublica.gov.co/web/eva/gestor-normativo>

DAGMA. (2023). *Científicos, ciudadanos y Sistema de Calidad del Aire, evidencian cómo algunas prácticas enferman a los caleños*. Retrieved 10 de Octubre from <https://www.cali.gov.co/dagma/publicaciones/174034/cientificos-ciudadanos-y-sistema-de-calidad-del-aire-evidencian-como-algunas-practicas-enferman-a-los-calenos/>

DANE. (2021). *La información del DANE en la toma de decisiones regionales: Cali – Valle del Cauca*. <https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/planes-departamentos-ciudades/210302-InfoDane-Cali-Valle-del-Cauca.pdf>

Delgado, L., Bachmann-Vargas, P., & Onate, B. (2007). Gobernanza ambiental: una estrategia orientada al desarrollo sustentable local a través de la participación ciudadana. *Revista Ambiente y Desarrollo*, 23.

Echeverry, G., Rojas, N., & Becerra, J. (2021). *Impact of traffic variability on the concentration of particulate matter in Santiago de Cali*. <https://doi.org/10.1109/CASAP54985.2021.9703409>

Echeverry-Prieto, G., Rojas, N. Y., & Mosquera Becerra, J. (2023). Cambios en la calidad del aire asociados al tráfico automotor, durante el aislamiento por COVID-19 en Santiago de Cali, Colombia. *Ingeniería y Competitividad*, 25(1), e-20711891. <https://doi.org/10.25100/iyc.v25i1.11891>

Elbestar, M., Aly, S. G., & Ghannam, R. (2024). Advances in Air Quality Monitoring: A Comprehensive Review of Algorithms for Imaging and Sensing Technologies. *Advanced Sensor Research*, 3(11), 2300207. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/adsr.202300207>

EPA. (2023a). *Conceptos básicos sobre el material particulado (PM, por sus siglas en inglés)*. 26 de junio del 2023. Retrieved 11 de octubre from <https://espanol.epa.gov/espanol/conceptos-basicos-sobre-el-material-particulado-pm-por-sus-siglas-en-ingles>

EPA. (2023b). *Preguntas frecuentes acerca de los sensores de aire*. Retrieved 07 de marzo from <https://espanol.epa.gov/espanol/preguntas-frecuentes-acerca-de-los-sensores-de-aire>

European Commission: Joint Research, C., Borowiak, A., Barbieri, M., Kotsev, A., Karagulian, F., Lagler, F., & Gerboles, M. (2019). *Review of sensors for air quality monitoring*. Publications Office. <https://doi.org/doi/10.2760/568261>

Fajardo-Montaña, O. A., Salinas, Y. A., Reyes, C., & Becerra-Casas, D. S. (2025). Monitoreo de la calidad del aire en zonas residenciales con sensores de bajo costo: Caso Santa Cecilia. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*(117), 104-114. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.20250157>

Giraldo Rodríguez, D. A. (2021). Participación ciudadana como instrumento para la investigación y la construcción de políticas de desarrollo sostenible.

Hernández, J. D. (2020). The protection of air quality standards before courts of justice in a context of the fight against climate change. *Revista Catalana de Dret Ambiental*, 11(2). <https://doi.org/10.17345/rcda2784>

IDEAM. (2019). *Informe del estado de la calidad del aire en Colombia 2019*. Retrieved 25 de Octubre from <http://www.ideam.gov.co/web/contaminacion-y-calidad-ambiental/informes-del-estado-de-la-calidad-del-aire-en-colombia>

IDEAM. (2021). *Informe de la calidad del aire en Colombia 2021*. Retrieved 26 de Septiembre from <http://www.ideam.gov.co/web/contaminacion-y-calidad-ambiental/informes-del-estado-de-la-calidad-del-aire-en-colombia>

IDEAM. (2022). *Informe del estado de la calidad del aire en Colombia 2022*. Retrieved 20 de febrero from https://drive.google.com/drive/folders/1pMltye2lJIMxDBJHvPsD573Va6_FoyNP

IDEAM. (2024). *Informe del Estado de la Calidad del Aire en Colombia 2023*. Retrieved 15 de septiembre from https://www.ideam.gov.co/sites/default/files/prensa/boletines/2024-12-19/informe_del_estado_de_la_calidad_del_aire_en_colombia_2023.pdf

Just, A. C., Arfer, K. B., Rush, J., Lyapustin, A., & Kloog, I. (2025). XIS-PM2.5: A daily spatiotemporal machine-learning model for PM2.5 in the contiguous United States. *Environmental Research*, 271 C7 - 120948. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.120948>

Khreis, H., Johnson, J., Jack, K., Dadashova, B., & Park, E. S. (2022). Evaluating the Performance of Low-Cost Air Quality Monitors in Dallas, Texas. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(3). <https://doi.org/10.3390/ijerph19031647>

Linda, J., Hasečić, A., Pospíšil, J., Kudela, L., & Brzezina, J. (2025). Impact of wind-induced resuspension on urban air quality: a CFD study with air quality data comparison. *npj Climate and Atmospheric Science*, 8(1 C7 - 74). <https://doi.org/10.1038/s41612-025-00969-2>

Liu, C., Chen, R., Sera, F., Vicedo-Cabrera Ana, M., Guo, Y., Tong, S.,... Kan, H. (2019). Ambient Particulate Air Pollution and Daily Mortality in 652 Cities. *New England Journal of Medicine*, 381(8), 705-715. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa1817364>

Mahajan, S., Chung, M.-K., Martinez, J., Olaya, Y., Helbing, D., & Chen, L.-J. (2022). Translating citizen-generated air quality data into evidence for shaping policy. *Humanities and Social Sciences Communications*, 9(1), 122. <https://doi.org/10.1057/s41599-022-01135-2>

Mantilla, O. G. F., Ortiz, L. R., Quintero, K. G., Acosta, K. V. P., Pachon, J. E., Tangarife, L. S. R.,...Poveda, A. M. P. (2021). Perception of Air Quality in Bogota and Surrounding Municipalities. 8th Congreso Colombiano y Conferencia Internacional en Calidad de Aire y Salud Publica, CASAP 2021 - Proceedings,

Martínez-Abarca, J. O., Sánchez-Acosta, M. I., Orozco-Medina, M. G., & Figueroa-Montaña, A. (2022). Contaminación del aire y percepción por exposición al humo de ladrilleras en Tonalá Jalisco, México. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 10(19), 99-107. <https://doi.org/10.29057/icbi.v10i19.8691>

Melo Muñoz, G. C. (2017). Participación ciudadana y desarrollo local, en la comuna 22 de Santiago de Cali 2004-2016. In: Universidad Icesi.

MinAmbiente. (2010). *PROTOCOLO PARA EL MONITOREO Y SEGUIMIENTO DE LA CALIDAD DEL AIRE*. Retrieved 9 de Diciembre from https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/Protocolo_Calidad_del_Aire_-_Manual_Operacion.pdf

MinAmbiente. (2015). *La contaminación atmosférica en Colombia*. <https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/contaminacion-atmosferica/>

MinAmbiente. (2018a). *Gobernanza del aire*. Retrieved 18 de Diciembre from <https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/gobernanza-del-aire/#:~:text=La%20gobernanza%20del%20aire%20se,de%20la%20calidad%20del%20aire.>

MinAmbiente. (2018b). *Lineamientos Política para el Mejoramiento de la Calidad del Aire*. Retrieved 20 de Noviembre from <https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/lineamientos-politica-para-el-mejoramiento-de-la-calidad-del-aire/>

MinAmbiente. (2021). *Modelo de la Gobernanza del aire para Colombia*. Retrieved 2023 from https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/03/GOBERNANZA_DEL_AIRE_DOC.pdf

Mohammadi Dashtaki, N., Fararouei, M., Mirahmadizadeh, A., Hoseini, M., & Heidarzadeh, M. (2025). A case-crossover study of air pollution exposure during pregnancy and the risk of stillbirth in Tehran, Iran. *Scientific Reports*, 15(1 C7 - 257). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-84126-4>

OMS. (2022). *Contaminación del aire ambiente (exterior)*. [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)

Pant, P., & Harrison, R. M. (2013). Estimation of the contribution of road traffic emissions to particulate matter concentrations from field measurements: A review. *Atmospheric Environment*, 77, 78-97. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.04.028>

Pota, P., Suwannasom, P., Chattipakorn, S. C., & Chattipakorn, N. (2025). From smog to scarred hearts: unmasking the detrimental impact of air pollution on myocardial ischemia-reperfusion injury. *Cellular and Molecular Life Sciences*, 82(1 C7 - 65). <https://doi.org/10.1007/s00018-025-05585-0>

Quirama-Aguilar, M., García Aguirre, D., & Gaona Quiroga, L. (2021). Gobernanza del aire: estrategia para el mejoramiento de la calidad del aire en ciudades. *Gestión y Ambiente*, 24(Supl3), 33-46. <https://doi.org/10.15446/ga.v24nSupl3.96609>

Romaszko-Wojtowicz, A., Dragańska, E., Doboszyńska, A., & Glińska-Lewczuk, K. (2025). Impact of seasonal biometeorological conditions and particulate matter on asthma and COPD hospital admissions. *Scientific Reports*, 15(1 C7 - 450). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-84739-9>

Salimbene, O., Baeza-Romero, M. T., Pilla, F., & Čok, G. (2024). Air Quality Awareness—Empirical Evidence from a Comparative Perspective between Two European Cities. *Urban Science*, 8(3). <https://doi.org/10.3390/urbansci8030133>

Schneider, P., Vogt, M., Haugen, R., Hassani, A., Castell, N., Dauge, F. R., & Bartonova, A. (2023). Deployment and Evaluation of a Network of Open Low-Cost Air Quality Sensor Systems. *Atmosphere*, 14(3 C7 - 540). <https://doi.org/10.3390/atmos14030540>

Science of South Africa, A. o., Sciences, B. A. o., Leopoldina, G. N. A. o. S., Medicine, U. S. N. A. o., & Sciences, U. S. N. A. o. (2019). Air Pollution and Health – A Science-Policy Initiative. *Annals of Global Health*. <https://doi.org/10.5334/aogh.2656>

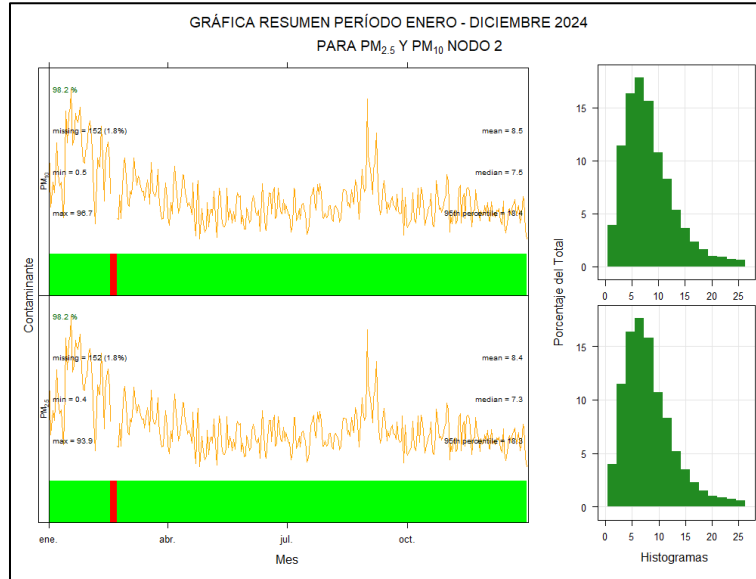
Shairsingh, K., Ruggeri, G., Krzyzanowski, M., Mudu, P., Malkawi, M., Castillo, J.,...Gumy, S. (2023). WHO air quality database: relevance, history and future developments. *Bulletin of the World Health Organization*, 101(12), 800-807. <https://doi.org/10.2471/BLT.23.290188>

SISAIRE. (2018). ¿Cómo opera un Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire? Retrieved 18 de Diciembre from http://sisaire.ideam.gov.co/ideam-sisaire-web/informacion.xhtml?de=como_opera

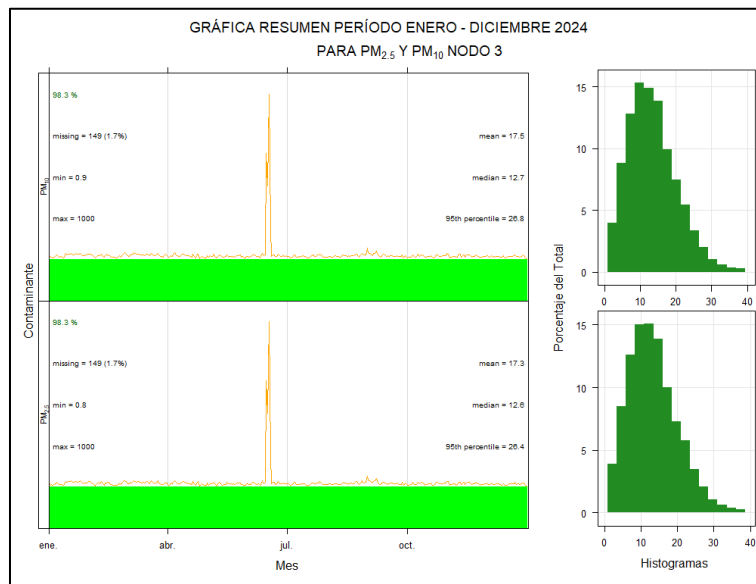
Ubilla, C., & Yohannessen, K. (2017). CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EFECTOS EN LA SALUD RESPIRATORIA EN EL NIÑO. *Revista Médica Clínica Las Condes*, 28(1), 111-118. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rmclc.2016.12.003>

ANEXOS

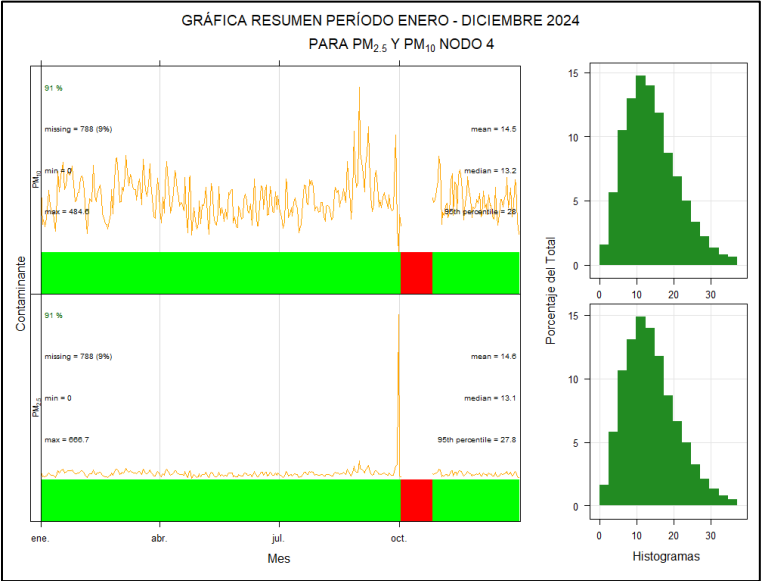
Anexo 1. Concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ durante el periodo de febrero a junio del 2023 en el nodo 2.



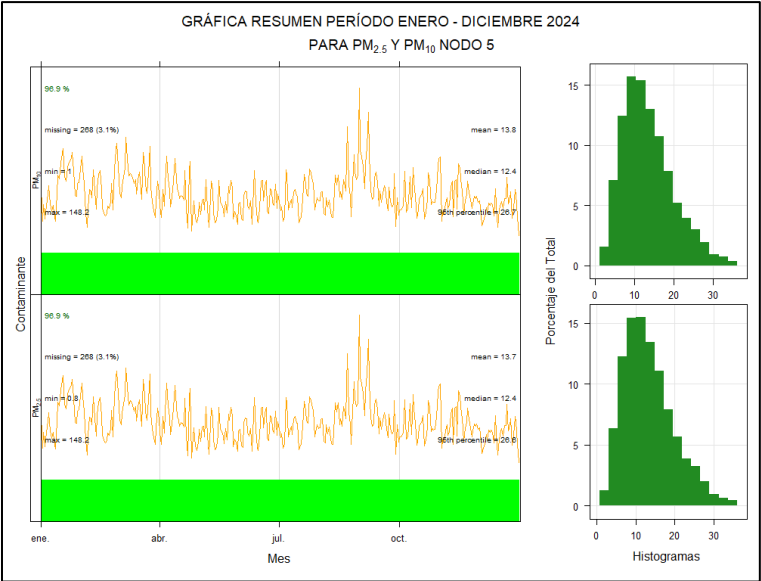
Anexo 2. Concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ durante el periodo de febrero a junio del 2023 en el nodo 3.



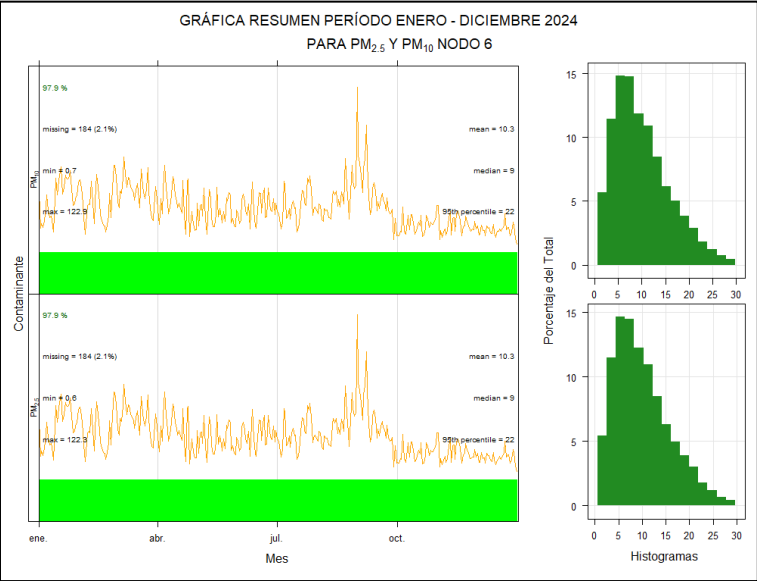
Anexo 3. Concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ durante el periodo de febrero a junio del 2023 en el nodo 4.



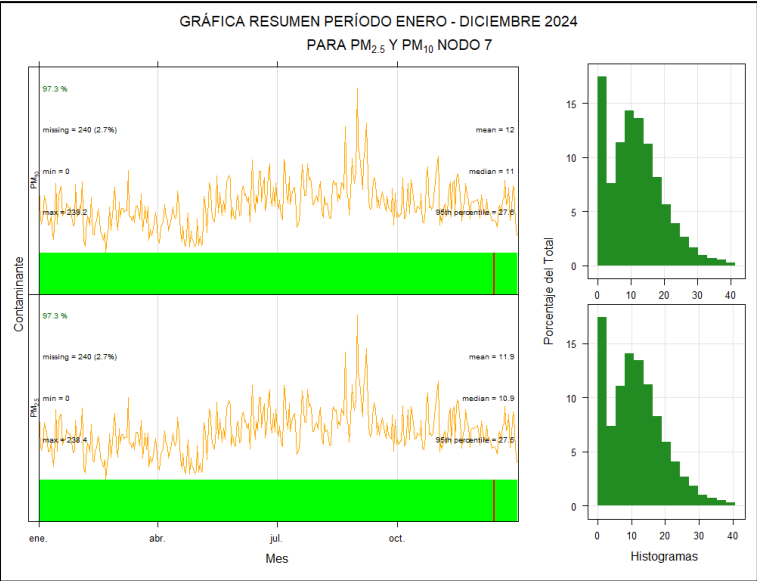
Anexo 4. Concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ durante el periodo de febrero a junio del 2023 en el nodo 5.



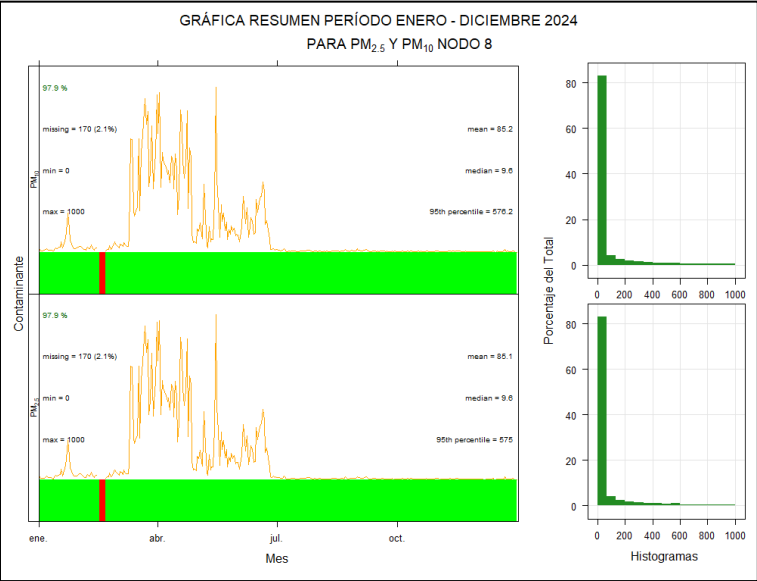
Anexo 5. Concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ durante el periodo de febrero a junio del 2023 en el nodo 6.



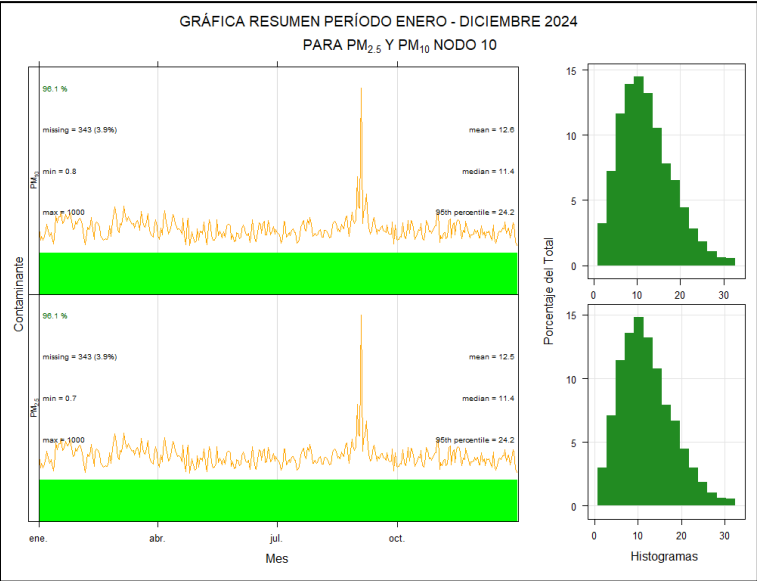
Anexo 6. Concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ durante el periodo de febrero a junio del 2023 en el nodo 7.



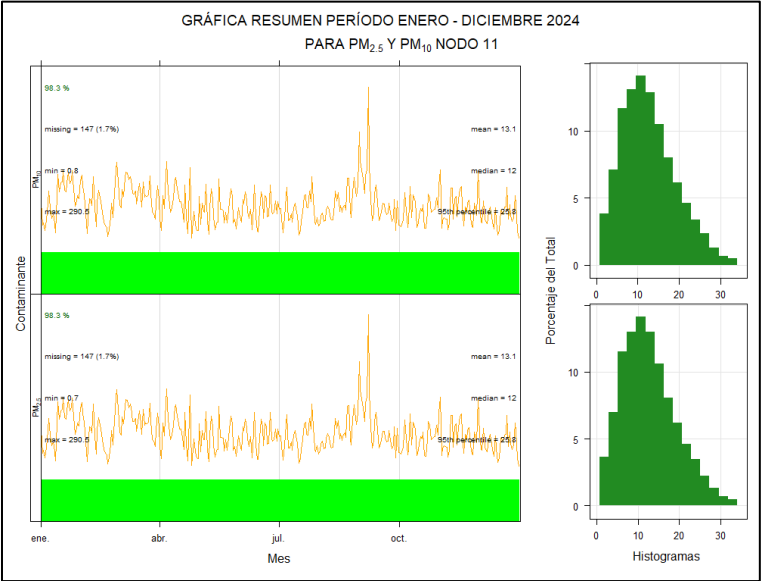
Anexo 7. Concentraciones de PM₁₀ y PM_{2.5} durante el periodo de febrero a junio del 2023 en el nodo 8.



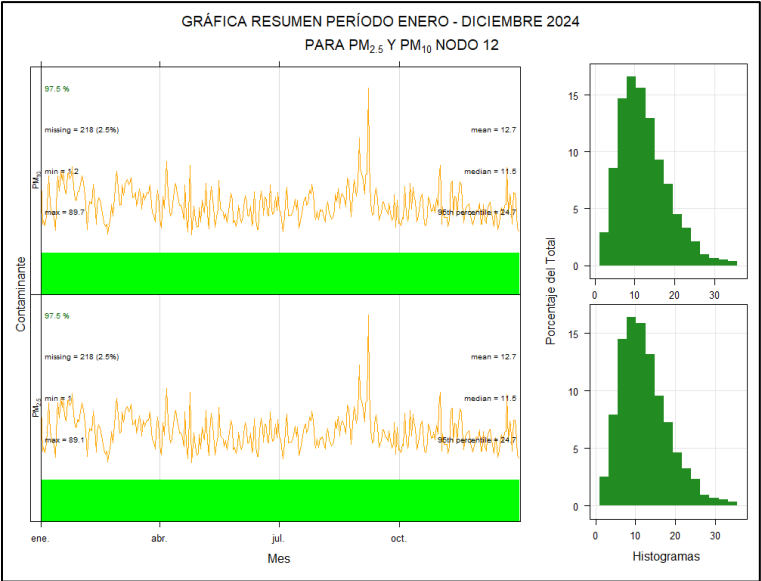
Anexo 8. Concentraciones de PM₁₀ y PM_{2.5} durante el periodo de febrero a junio del 2023 en el nodo 10.



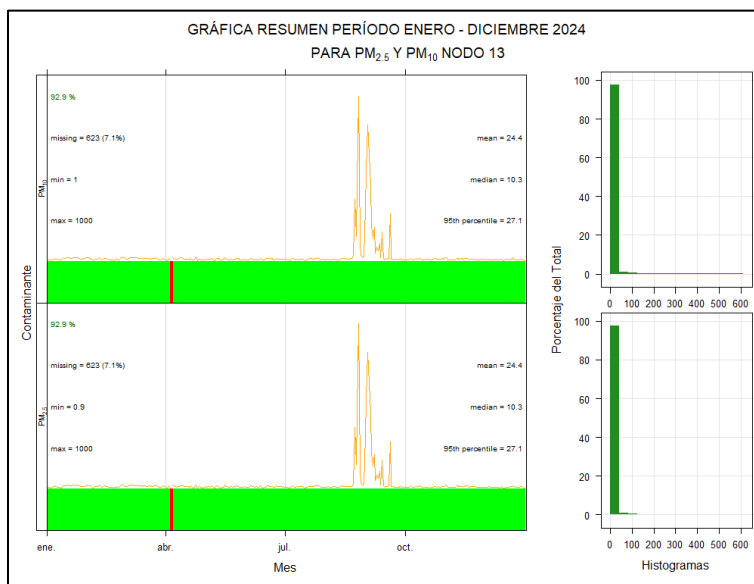
Anexo 9. Concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ durante el periodo de febrero a junio del 2023 en el nodo 11.



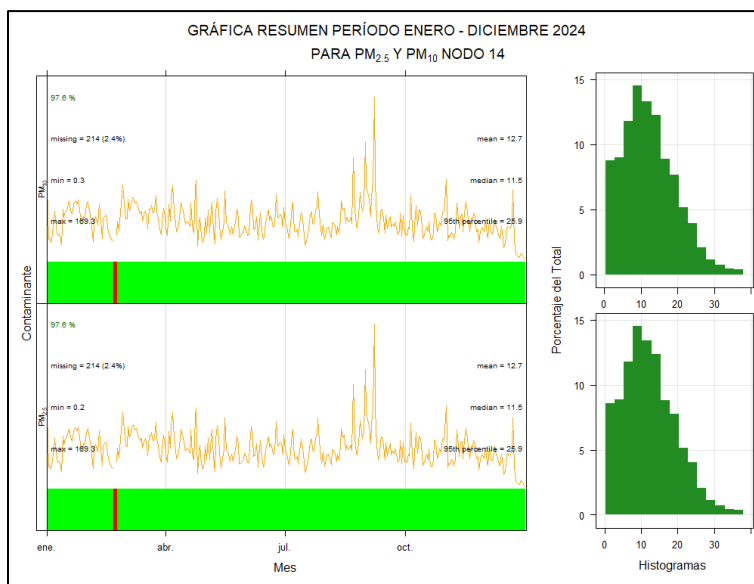
Anexo 10. Concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ durante el periodo de febrero a junio del 2023 en el nodo 12.



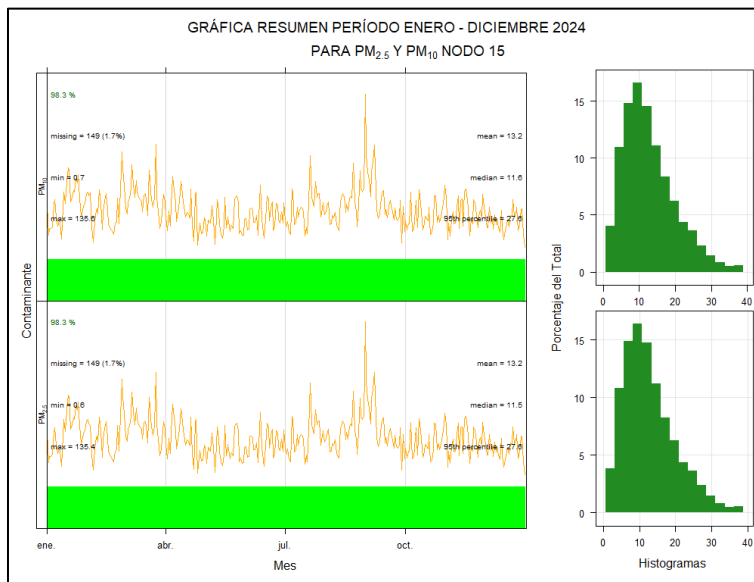
Anexo 11. Concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ durante el periodo de febrero a junio del 2023 en el nodo 13.



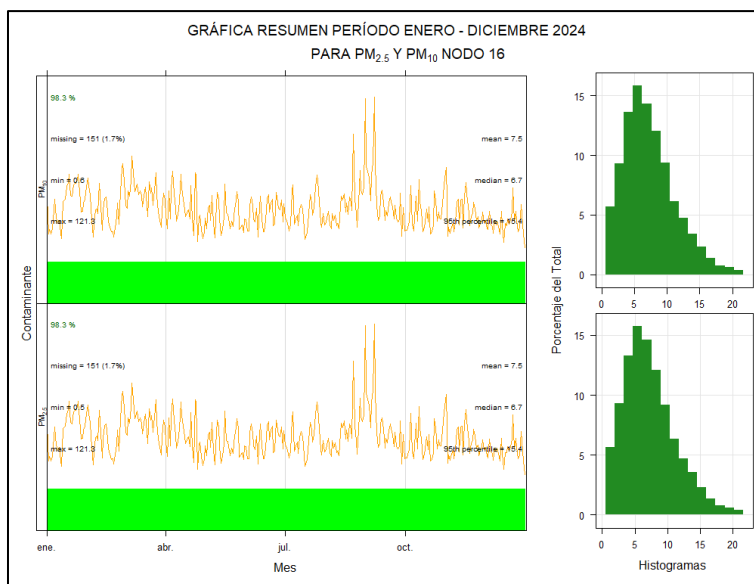
Anexo 12. Concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ durante el periodo de febrero a junio del 2023 en el nodo 14.



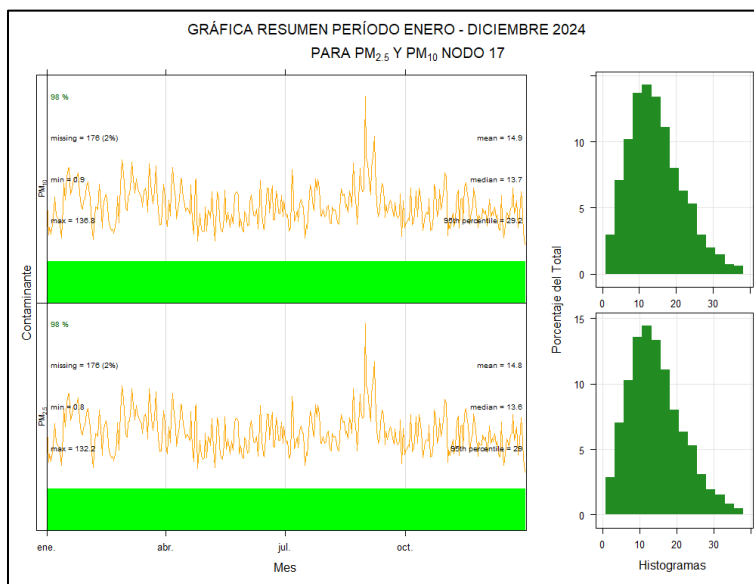
Anexo 13. Concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ durante el periodo de febrero a junio del 2023 en el nodo 15.



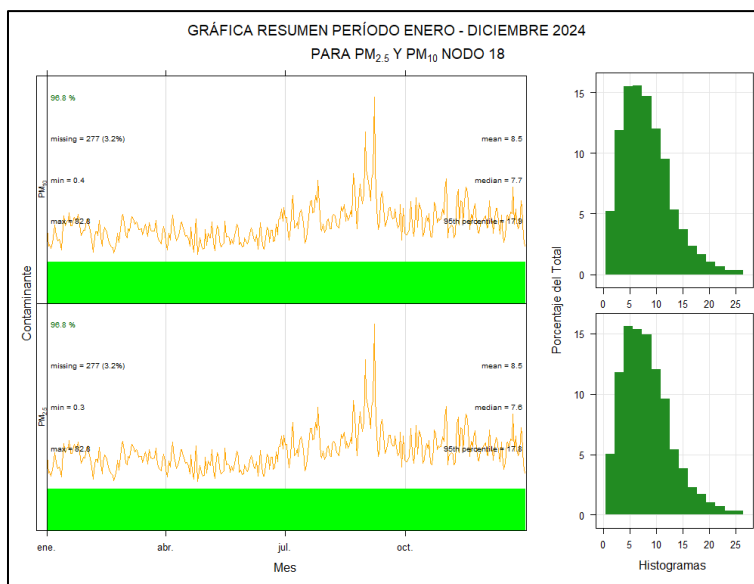
Anexo 14. Concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ durante el periodo de febrero a junio del 2023 en el nodo 16.



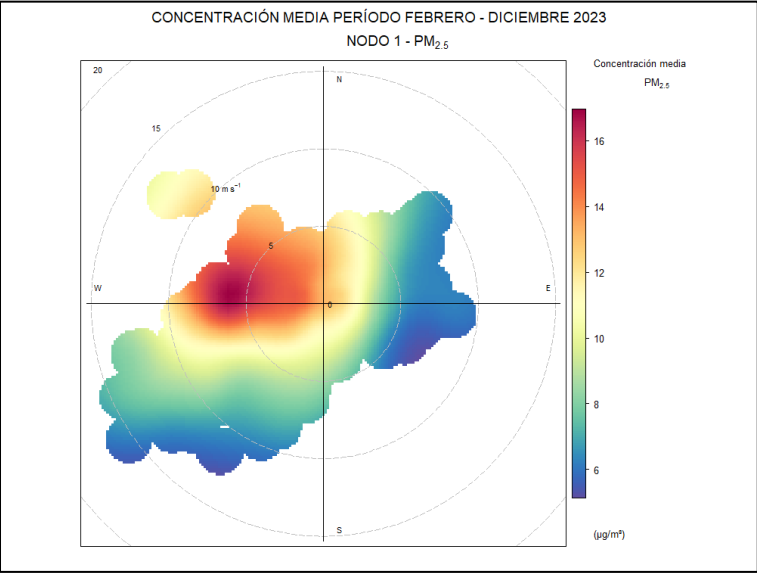
Anexo 15. Concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ durante el periodo de febrero a junio del 2023 en el nodo 17.



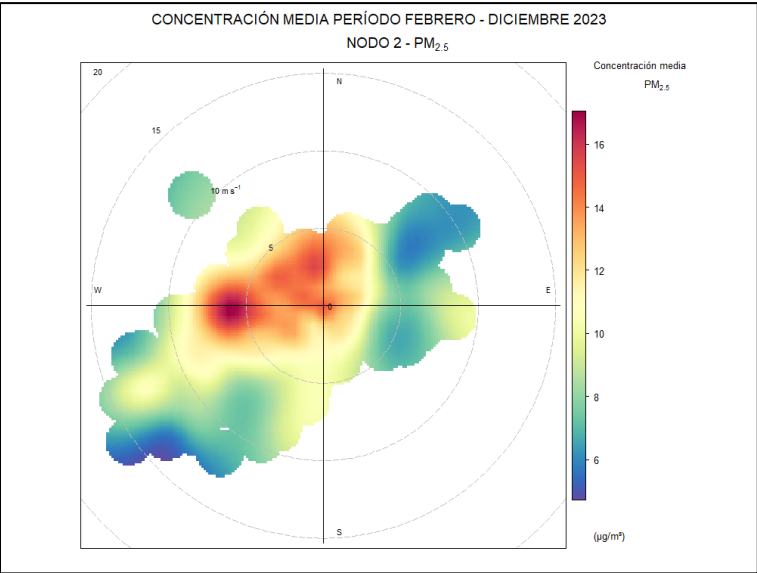
Anexo 16. Concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ durante el periodo de febrero a junio del 2023 en el nodo 18.



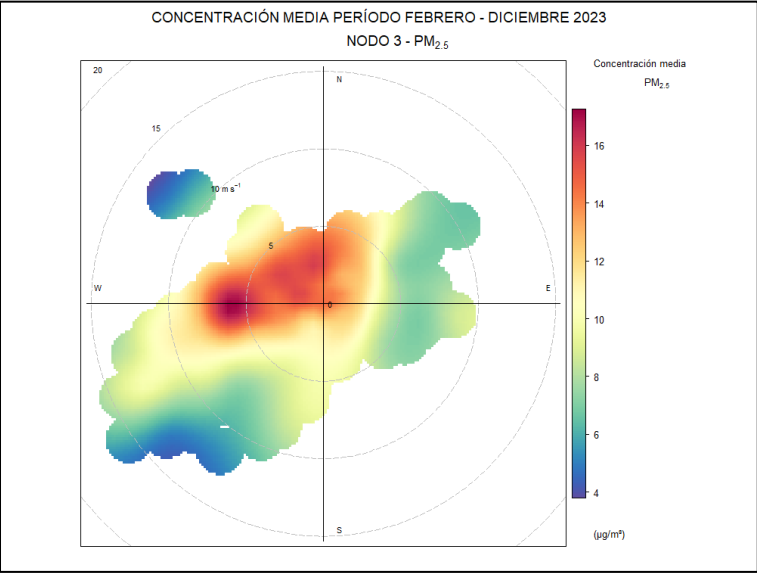
Anexo 17. Concentración media de $PM_{2.5}$ para el período de febrero a diciembre del 2023 en el nodo 1.



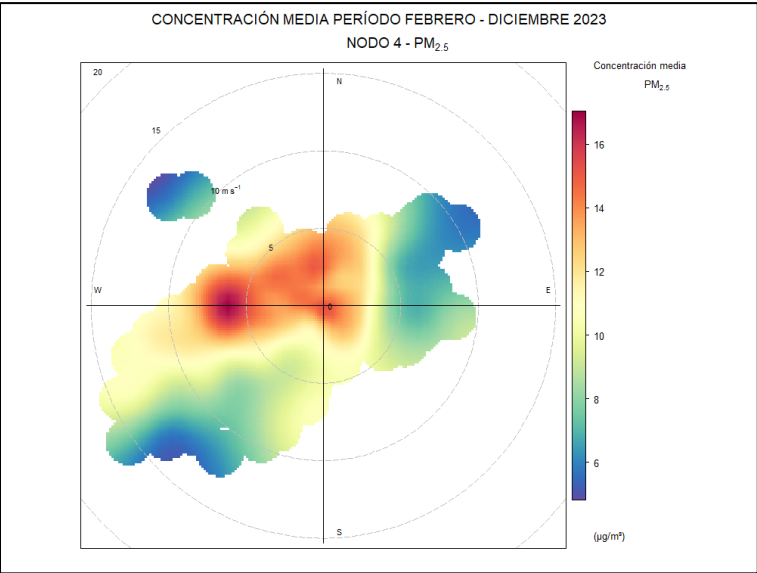
Anexo 18. Concentración media de $PM_{2.5}$ para el período de febrero a diciembre del 2023 en el nodo 2.



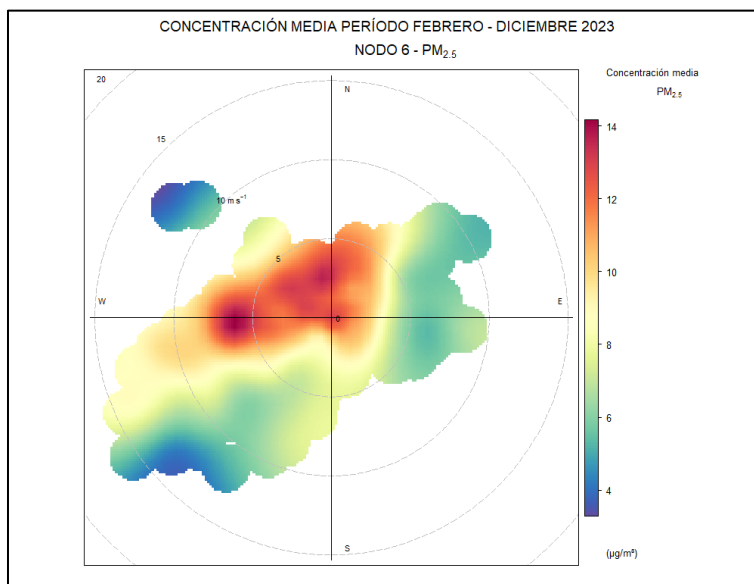
Anexo 19. Concentración media de $PM_{2.5}$ para el período de febrero a diciembre del 2023 en el nodo 3.



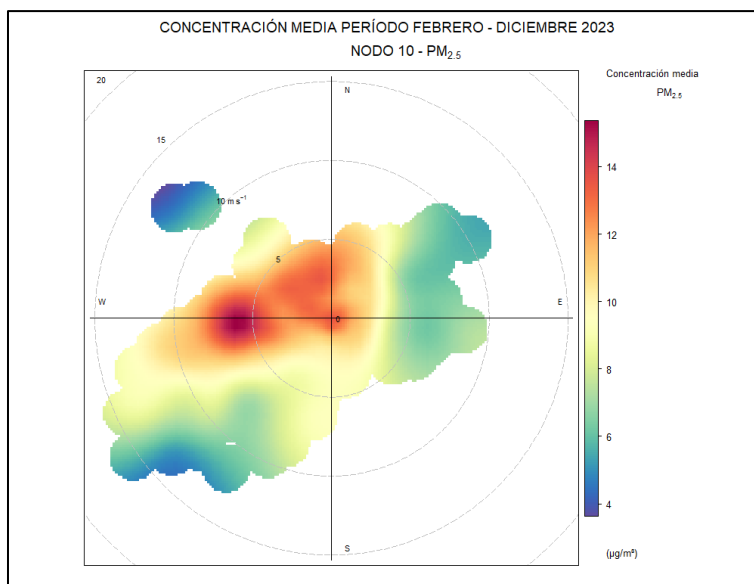
Anexo 20. Concentración media de $PM_{2.5}$ para el período de febrero a diciembre del 2023 en el nodo 4.



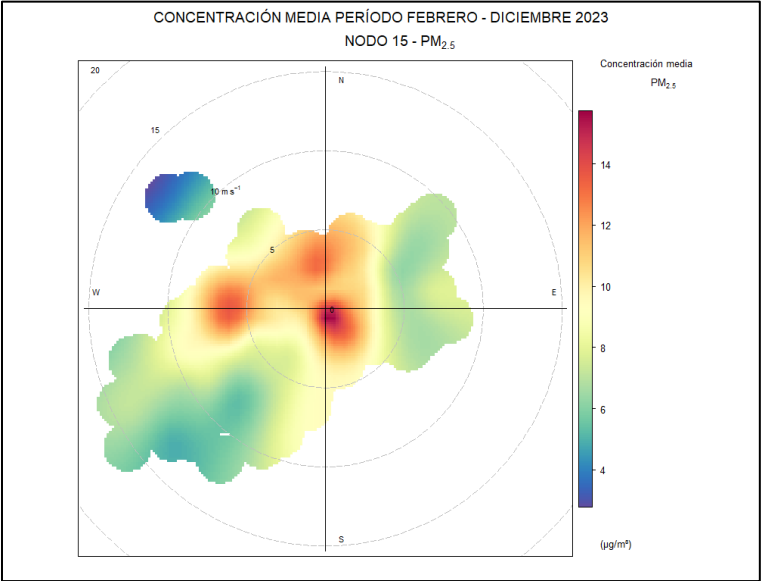
Anexo 21. Concentración media de $PM_{2.5}$ para el período de febrero a diciembre del 2023 en el nodo 6.



Anexo 22. Concentración media de $PM_{2.5}$ para el período de febrero a diciembre del 2023 en el nodo 10.



Anexo 23. Concentración media de $PM_{2.5}$ para el período de febrero a diciembre del 2023 en el nodo 15.



Anexo 24. Concentración media de $PM_{2.5}$ para el período de febrero a diciembre del 2023 en el nodo 17.

