



**EVALUACIÓN DE LA EXPOSICIÓN A MATERIAL
PARTICULADO $PM_{2.5}$ y PM_{10} EN LOS HABITANTES DE LA
ZONA CENTRO DEL MUNICIPIO DE JAMUNDÍ - VALLE DEL
CAUCA**

KEVIN STEVEN BRAVO MANZANO

Universidad del Valle

Facultad de Ingeniería

Escuela de Recursos Naturales y del Ambiente

Programa de Ingeniería Sanitaria y Ambiente

Santiago de Cali

2025

**EVALUACIÓN DE LA EXPOSICIÓN A MATERIAL PARTICULADO PM_{2.5} y PM₁₀ EN
LOS HABITANTES DE LA ZONA CENTRO DEL MUNICIPIO DE JAMUNDÍ - VALLE
DEL CAUCA**

KEVIN STEVEN BRAVO MANZANO

Autor

Ing. MSc, PhD. JUAN PABLO SILVA VINASCO

Director

Trabajo de grado para optar por el título de:

Ingeniero Sanitario y Ambiental

Línea de Investigación:

Calidad del Aire – Contaminación por material particulado

Universidad del Valle

Facultad de Ingeniería

Escuela de Recursos Naturales y del Ambiente

Programa de Ingeniería Sanitaria y Ambiente

Santiago de Cali, Valle del Cauca

Mayo 2025

Contenido

1.	Introducción.....	9
2.	Planteamiento del problema	11
3.	Justificación.....	15
4.	Objetivos	17
4.1.	Objetivo General:.....	17
4.2.	Objetivos específicos:	17
5.	Marco teórico	18
5.1.	Contaminación atmosférica	18
5.2.	Fuentes de contaminación atmosférica	18
5.3.	Contaminantes criterio.....	19
5.4.	Índice de calidad del aire	19
5.5.	Material particulado.....	21
5.6.	Sensores ópticos para determinación de la calidad del aire.....	22
5.7.	Sistemas de Vigilancia de Calidad del Aire (SVCA).....	23
5.8.	Análisis de la exposición	24
6.	Metodología.....	26
6.1.	Modelo de estudio.....	26
6.2.	Localización de la zona de estudio	26
6.3.	Localización de los puntos de monitoreo	27
6.4.	Identificación de fuentes	30
6.5.	Determinación de jornadas de muestreo	33
6.6.	Procedimiento para monitoreo y muestreo	33
6.7.	Determinación de las concentraciones de PM ₁₀ y PM _{2.5}	33
6.8.	Determinación del tamaño de muestra.....	35
6.9.	Evaluación de percepción de la comunidad respecto a la calidad del aire.	36
6.10.	Estimación de la exposición al material particulado.	37
6.11.	Análisis de la información	39
6.12.	Selección y depuración de datos.....	40
7.	Resultados y discusión	40
7.1.	Análisis de mediciones y determinación de concentraciones para PM ₁₀ y PM _{2.5}	40
7.1.1.	Comparación semanal para jornadas	41
7.1.2.	Comparación semanal para día compuesto.....	44
7.2.	Análisis de mediciones de PM y determinación de concentraciones por días en jornadas de mañana y tarde	45
7.2.1.	Lunes.....	46
7.2.2.	Miércoles.....	47
7.2.3.	Viernes	49
7.2.4.	Sábado.....	50

7.2.5.	Domingo	52
7.3.	Análisis de mediciones y determinación de concentraciones por días compuestos .	54
7.3.1.	PM ₁₀ días compuestos	54
7.3.1.	PM _{2.5} días compuestos	57
7.3.2.	Registro de mediciones de PM ₁₀ y PM _{2.5}	60
7.3.3.	Relación entre concentraciones promedio de PM ₁₀ y PM _{2.5}	62
7.3.4.	Evaluación de la dispersión de PM _{2.5} y PM ₁₀ mediante rosas de contaminantes	65
7.4.	Análisis por punto de muestreo	68
7.4.1.	Determinación para jornadas	69
7.4.2.	Determinación para día compuesto.....	70
7.5.	Resumen concentraciones determinadas	74
7.6.	Comparación con informe de calidad del aire CVC	75
7.7.	Análisis de encuestas y determinación de la percepción de la calidad del aire	77
7.7.1.	Variables sociodemográficas.....	78
7.7.2.	Resultados del formulario de evaluación	80
7.8.	Determinación de la exposición al material particulado.....	88
8.	Conclusiones	93
9.	Referencias	95
10.	Anexos.....	101

Índice de figuras

Figura 1. Distribución típica de partículas en la atmosfera	22
Figura 2. Principio de funcionamiento de sensor óptico.....	23
Figura 3. Autoridades ambientales con SVCA acreditados por el IDEAM	24
Figura 4. Ubicación del municipio de Jamundí en el departamento del Valle del Cauca.	26
Figura 5. Localización de puntos de muestreo preliminares.....	27
Figura 6. Localización de puntos de muestreo.....	28
Figura 7. Puntos de muestreo.....	29
Figura 8. Fuentes emisoras fijas y/o estacionarias observadas	31
Figura 9. Identificación de fuentes emisoras	32
Figura 10. Dispositivo AirBeam 3	34
Figura 11. Dispersión y rosa de contaminantes mes de julio.....	68

Índice de graficas

Gráfico 1. Comparación semana PM ₁₀ jornada mañana (07:00 – 13:00)	41
Gráfico 2. Comparación semana PM ₁₀ jornada tarde (13:00 – 19:00)	42
Gráfico 3. Comparación semana PM _{2.5} jornada mañana (07:00 – 13:00)	43
Gráfico 4. Comparación semana PM _{2.5} jornada tarde (13:00 – 19:00)	43
Gráfico 5. Comparación semana PM ₁₀ día compuesto	44
Gráfico 6. Comparación semana PM _{2.5} día compuesto.....	45
Gráfico 7. PM ₁₀ jornada lunes.....	46
Gráfico 8. PM _{2.5} jornada lunes	47
Gráfico 9. PM ₁₀ jornada miércoles	48
Gráfico 10. PM _{2.5} jornada miércoles.....	48
Gráfico 11. PM ₁₀ jornada viernes.....	49
Gráfico 12. PM _{2.5} jornada viernes	50
Gráfico 13. PM ₁₀ sábado.....	51
Gráfico 14. PM _{2.5} sábado	51
Gráfico 15. PM ₁₀ domingo (tarde)	53
Gráfico 16. PM _{2.5} domingo (tarde).....	53
Gráfico 17. PM ₁₀ lunes	55
Gráfico 18. PM ₁₀ miércoles	55
Gráfico 19. PM ₁₀ viernes	56
Gráfico 20. PM ₁₀ sábado.....	56
Gráfico 21. PM _{2.5} lunes	57
Gráfico 22. PM _{2.5} miércoles	58
Gráfico 23. PM _{2.5} viernes	58
Gráfico 24. PM _{2.5} sábado	59
Gráfico 25. Registro mediciones PM ₁₀ (µg/m).....	60

Gráfico 26. Registro mediciones PM _{2.5}	61
Gráfico 27. Registro lineal de mediciones PM ₁₀ y PM _{2.5}	62
Gráfico 28. Relación concentraciones promedio PM _{2.5} y PM ₁₀	63
Gráfico 29. Relación concentraciones promedio PM _{2.5} y PM ₁₀ por días.....	63
Gráfico 30. Asociación estadística entre PM _{2.5} y PM ₁₀	64
Gráfico 31. Rosa de contaminantes PM ₁₀	66
Gráfico 32. Rosa de contaminantes PM _{2.5}	67
Gráfico 33. Mapa de calor puntos de muestreo (jornada de mañana).....	69
Gráfico 34. Diagrama de barras puntos de muestreo (jornada de mañana)	69
Gráfico 35. Mapa de calor puntos de muestreo (jornada de tarde)	70
Gráfico 36. Diagrama de barras puntos de muestreo (jornada de tarde)	70
Gráfico 37. Mapa de calor puntos de muestreo (día compuesto)	71
Gráfico 38. Diagrama de barras puntos de muestreo (día compuesto)	71
Gráfico 39. Edad de los encuestados	78
Gráfico 40. Genero de los encuestados	79
Gráfico 41. Estrato de los encuestado	79
Gráfico 42. Nivel de educación de los encuestados.....	80
Gráfico 43. Tiempo de residencia en Jamundí.....	81
Gráfico 44. Problemática ambiental significativa.....	81
Gráfico 45. Conocimiento sobre contaminación del aire y sus efectos en la salud	82
Gráfico 46. Calificación calidad del aire	83
Gráfico 47. Nivel de conocimiento sobre calidad del aire local.	83
Gráfico 48. Efectos en la salud por la mala calidad del aire.....	84
Gráfico 49. Enfermedades presentadas asociadas a la mala calidad del aire.....	85
Gráfico 50. Preocupación frente a la calidad del aire	85
Gráfico 51. Factores que contribuyen a la contaminación del aire.....	86
Gráfico 52. Conocimiento sobre medidas locales para mejorar la calidad del aire	87

Índice de tablas

Tabla 1. Contaminantes criterio según resolución 2254 del 2017 en contraste con las recomendaciones de la OMS	19
Tabla 2. Descripción del Índice de Calidad del Aire.....	20
Tabla 3. Puntos de corte del ICA	21
Tabla 4. Características de los puntos de muestreo.....	30
Tabla 5. Valores recomendados a exposición por inhalación patrones de actividad – Periodos cortos.....	38
Tabla 6. Valores recomendados para patrones de actividad – Tiempo en las afueras	39
Tabla 7. Velocidad y dirección de los vientos	66
Tabla 8. Resumen concentraciones en jornada de mañana	74
Tabla 9. Resumen concentraciones en jornada de tarde.....	74

Tabla 10. Resumen concentraciones día completo	75
Tabla 11. Resumen concentraciones por punto	75
Tabla 12. Concentraciones de PM según fuentes de información	76
Tabla 13. Comparativa de PM con fuentes de información	77
Tabla 14. Dosis potencial jornadas	89
Tabla 15. Dosis potencial día completo	89
Tabla 16. Dosis potencial puntos de muestreo	90

Resumen

El presente trabajo de grado tuvo como propósito principal evaluar la exposición a material particulado PM_{10} y $PM_{2.5}$ en habitantes y visitantes de la zona centro del municipio de Jamundí, Valle del Cauca, específicamente en el área de influencia de la plaza de mercado, comprendida entre las calles 11 y 12 y las carreras 7 y 10 que delimitan este sector. Este municipio, históricamente reconocido por un entorno rural y un desarrollo urbano acelerado, enfrenta un desafío ambiental significativo, arraigado a su crecimiento urbano y comercial, destacando la contaminación del aire como uno de los factores críticos e influyentes en la salud de sus habitantes, siendo la contaminación por material particulado (PM, por sus siglas en inglés) uno de los principales problemas.

Este estudio, realizado en la zona central de la localidad, dada su importancia comercial y al alto flujo de personas y vehículos que frecuenta, así como su actuar de punto clave para direccionarse a las diferentes estancias del municipio, tuvo como objetivo determinar y evaluar la exposición al material particulado PM_{10} y $PM_{2.5}$ de los habitantes y visitantes, empleando un sensor portátil AirBeam 3 durante 6 meses (febrero a julio de 2024), considerando diferentes puntos de muestreo, mediante análisis de las concentraciones ambientales y un enfoque metodológico para las mediciones de calidad del aire, el cual no solo permitió determinar las concentraciones de PM sino también, la percepción de la comunidad a esta problemática ambiental mediante encuestas, revelando que la población posee una preocupación generalizada por el aire que se respira, pero carece de información clara, denotando un amplio desconocimiento de la calidad del aire, sus efectos en la salud y los factores que contribuyen a la contaminación.

Las mediciones realizadas alcanzaron valores que ocasionalmente superaban las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS) para el año 2015 respecto al $PM_{2.5}$, especialmente durante jornadas de la tarde y en puntos de alta influencia vehicular para partículas finas ($PM_{2.5}$). No obstante, las concentraciones se mantienen sobre lo establecido para la resolución 2254 para ambos contaminantes. Se determinó como día crítico el lunes, ya que registra los mayores valores promedio con $17.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} y $15.13 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$, día sobre el cual también se determinó el punto crítico, correspondiente al G, presente sobre la carrera 9 del municipio donde se presenta un promedio máximo de $26.66 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} y $20.09 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$. En este sentido, las dosis potenciales alcanzaron hasta $160.82 \mu\text{g}/\text{día}$ para visitantes y $998.18 \mu\text{g}/\text{día}$ para residentes en el punto G, lo que evidencia un riesgo acumulativo significativo para grupos sensibles como niños, adultos mayores y personas con enfermedades respiratorias o cardiovasculares.

Los resultados obtenidos indicaron que; aunque las concentraciones se encuentran dentro los límites establecidos por la resolución 2254 de 2017, se superan en algunos casos los valores recomendados por la OMS. Estos hallazgos destacan la importancia de coordinar acciones entre autoridades y ciudadanos para proteger la salud pública, priorizando el control y la regulación de emisiones vehiculares, así como implementar campañas de sensibilización ambiental, apartados que solo se pueden conseguir trabajando en conjunto entre todos los involucrados.

Palabras Clave: Material Particulado, PM_{10} , $PM_{2.5}$, Percepción comunitaria, Exposición, Contaminación del aire, AirBeam 3, Jamundí.

1. Introducción

La Contaminación Atmosférica (CA) se puede definir como la presencia de elementos y sustancias nocivas en el aire que pueden tener efectos negativos para la salud humana y el medio ambiente. Estas sustancias provienen de diferentes fuentes relacionadas con actividades antropogénicas tales como la agricultura, la industria y el transporte (OMS, 2022). Entre los contaminantes del aire se han identificado el monóxido de carbono (CO), los óxidos de nitrógeno (NO_x), el dióxido de azufre (SO₂), el ozono (O₃), los compuestos orgánicos volátiles (COVs), y el denominado material particulado ‘PM’ por sus siglas en inglés (*Particulate Matter*). Este último contaminante reviste importancia pues se ha establecido que es el de mayor impacto en la salud cuando está presente en el aire exterior urbano (Ataz & Mera Morales, 2004).

El PM se puede definir como una composición de partículas de diferentes tamaños en estado sólido o líquido proveniente de actividades antropogénicas o de fuentes naturales, que se encuentra suspendidas en el aire. En el ámbito de la contaminación atmosférica el PM es clasificado en base a diferentes tamaños, siendo identificadas tamaños para de PM_{1.0} y PM_{2.5} llamadas partículas menores a 1.0 µm y 2.5 µm que se denominan finas; por su parte las partículas PM₁₀, entre 2.5 µm a 10 µm, se conocen como gruesas. Las partículas finas representan riesgos significativos a la salud humana, debido a su facilidad para ingresar por las vías respiratorias, generando así afecciones relacionadas con enfermedades cardiovasculares, respiratorias tales como neumonía y cáncer de pulmón, entre otras afecciones, conllevando a un riesgo elevado de muerte (IDEAM, 2024). Según evidencia científica, el incremento de 10 µg/m³ en la concentración de material particulado fino (PM_{2.5}), genera un aumento en la mortalidad en un 8% (considerando el total de muertes relacionadas) 6% (cardiovascular), 7% (respiratoria) y 11,8% (cáncer de pulmón). Este efecto se ve intensificado por exposiciones prolongadas y grupos poblacionales como los adultos mayores que sufren con mayor severidad las consecuencias (Behrooz & Sadegh, 2024). Además, según instituciones bajo el mando de PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente), las altas concentraciones de partículas finas también contribuyen a otras enfermedades como la diabetes, retraso en el desarrollo cognitivo en niños y problemas de salud mental (UNEP, 2021)

El impacto ocasionado por el material particulado fino en la actualidad se manifiesta como un problema de salud pública a escala global, en 2019, más del 90% de la población mundial vivía en zonas en donde las concentraciones superaban los niveles de referencia fijados por la OMS sobre 10 µg/m³ en el 2005 con respecto a la exposición prolongada a las PM_{2.5}. Para este año (2019) se estima que alrededor de 4 millones de personas murieron por causas atribuibles a la contaminación por PM, presentando las tasas más altas de mortalidad en el Este de Asia y Europa Central (UNEP, 2021). En el caso de Colombia, se ha reportado que el 17 % de los municipios con estaciones de SVCA alcanzan niveles que superan la norma anual nacional establecida en 25µg/m³ para PM_{2.5} y el 78 % supera el valor recomendado por la OMS (2015) como objetivo intermedio III89 (DNP, 2018). Igualmente, se ha reportado que para el 2015, se estimaron costos ambientales del 1.93 % del PIB y más de 10.000 muertes asociados a la contaminación atmosférica (IDEAM, 2019).

Sin embargo, aunque existe una larga tradición de monitoreo de la calidad del aire en Colombia en las ciudades grandes, esta capacidad de vigilancia no ha avanzado en municipios pequeños o intermedios, los cuales, aunque no tienen la connotación de zonas especiales, exhiben una particularidad de crecimiento urbanístico, comercial y automotor, debido a que se han ido

transformando a “ciudades dormitorio”. En este contexto se inserta el municipio de Jamundí, localizado en el Valle del Cauca, el cual, en los últimos quince años ha ofrecido una dinámica de expansión urbana, constituyéndose para la actualidad en gran parte como una ciudad dormitorio para los habitantes de Cali los cuales se han mudado a este municipio debido a la factibilidad de obtención de vivienda o en busca de un ambiente sano (Lopez Restrepo, 2021).

Esta situación ha generado un retroceso en la calidad del aire de este municipio, ya que según los Informes del Estado de la Calidad del Aire en Colombia elaborados por el IDEAM; para su informe del 2022, en el cual se reportan valores específicos para Jamundí; para un periodo de exposición anual se registraron concentraciones de $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ PM_{10} . El informe para el año 2021 (último informe con reporte de datos para $\text{PM}_{2.5}$) se registra un valor de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ $\text{PM}_{2.5}$, valores que cumplen con la Resolución 2254 del 2017 pero, en el caso del PM_{10} superan lo recomendado por la OMS. Por su parte, siguiendo el informe regional de la calidad del aire elaborado por la CVC, para el año 2024 se registra únicamente para el municipio de Jamundí, un valor promedio de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el $\text{PM}_{2.5}$, manteniéndose así sobre el límite recomendado por la OMS (CVC, 2024). Estos resultados evidencian un cumplimiento local, pero una deficiencia por alcanzar los estándares de la OMS a los cuales busca llegar la normativa, excediendo en reiteradas ocasiones los niveles.

A partir de estos argumentos este trabajo tiene como objetivo fundamental evaluar la contaminación por material particulado PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$ en la zona urbano central del municipio de Jamundí, determinando la concentración, exposición y percepción de este en distintos puntos de muestreo con el fin de identificar las condiciones de calidad del aire en la localidad, para ello este documento presenta los elementos esenciales que dan paso al problema de investigación, su justificación, objetivos, la metodología para cumplir los mismos.

2. Planteamiento del problema

La CA puede definirse de manera simple como la presencia de elementos y sustancias nocivas en el aire que pueden tener efectos negativos sobre la salud humana y el medio ambiente. (Ataz & Mera Morales, 2004). Aunque la contaminación atmosférica puede originarse por procesos naturales como erupciones volcánicas, incendios forestales o incluso desde las mismas plantas por la generación de compuestos orgánicos volátiles (COV), fuentes que contribuyen al aumento de la concentración del material particulado, y, por ende, en la contaminación atmosférica, especialmente cuando se presenta una baja actividad antropogénica (Moriana, 2018). Es esta última, la que representa la mayor parte de esta generación debido a actividad industrial, quema de combustibles, entre otras categorizando las fuentes en base a su distribución espacial como fuentes fijas (zonas industriales, comerciales y fuentes de área como canteras u obras) o móviles (constituidas principalmente por medios de transporte). Los principales contaminantes según las guías de la OMS para el año 2021 son el PM₁₀, PM_{2.5}, O₃, NO₂, SO₂ y CO, estos contaminantes son los principales causantes de problemáticas relacionadas como la morbilidad y mortalidad por enfermedades de tipo respiratorio, cardiovasculares, entre otras. Además, los contaminantes NO_x y el SO₂ contribuyen en efectos como la lluvia ácida teniendo una mayor implicación ambiental (OMS, 2022).

Es un hecho generalmente aceptado en la comunidad científica que el dióxido de nitrógeno, el ozono troposférico y el PM son los tres contaminantes que más afectan a la salud humana convirtiéndose, dado a su elevada presencia por las fuentes de contaminación fruto de la actividad antropológica representan un riesgo para la salud pública, múltiples revisiones evidencian su elevado impacto en la mortalidad y morbilidad, siendo determinantes por su relación en enfermedades de tipo cardiovascular, cáncer de pulmón, isquémicas del corazón, entre otras. (Kasdagli y otros, 2024). En este sentido, el PM se presenta como uno de los contaminantes con mayor impacto en la salud, algunos de los efectos descritos por el Informe del Estado de Calidad del Aire en Colombia para el año 2023 elaborado por el IDEAM (2024) debido a elevadas concentraciones respecto a salud son asma agravada, irritación de vías respiratorias, función pulmonar reducida, infartos de miocardio no mortales, latidos irregulares, irritación ocular, ojos llorosos, tos, flema, fatiga inusual, entre otras. Respecto al medio ambiente se encuentra daño en los bosques sensibles y cultivos agrícolas, acidez de lagos y arroyos, reducción de nutrientes en el suelo, entre otros.

Según la OMS (2019), se estimó que la exposición al PM fino provocó cerca de 4.2 millones de muertes prematuras debido a que es causante de la agudización de enfermedades respiratorias, cardiovasculares y cánceres. Según un informe de la Agencia Europea del Medio Ambiente (2023), para el año 2022 en la unión europea, se presentaron niveles de partículas finas superiores al nivel de referencia establecido por la OMS, además compuestos como el benzopireno de carácter cancerígeno, aumentaron su concentración debido a la quema de combustibles en la región central, según la información recolectada, para los 27 países miembros de la unión europea se presentaron más de 238.000 muertes prematuras a causa de la contaminación del aire. (OMS, 2022)

En Asia han sido identificados problemas de contaminación de aire con la mayor afectación a nivel mundial, muchos de los países del continente, comúnmente reconocidos como potencias industriales han presentado modelos de desarrollo que han afectado la salud de la población de manera drástica (Du y otros, 2024). La ciudad de Nueva Delhi, ubicada en la India ha sido

identificada como la capital más contaminada del mundo reportando un estimado de 54.000 muertes prematuras para el año 2020 según la información documentada por IQAir (IQAir, 2021). Por su parte, en América Latina también se presentan situaciones críticas frente a la contaminación atmosférica, según fuentes como IQAir y organizaciones como Greenpeace, se ha determinado que las concentraciones de material particulado fino en países del continente superan los niveles aprobados y establecidos por la OMS. Para el año 2021, en el contexto latinoamericano, algunos países como Perú ($23,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Chile ($22,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$), México ($19,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Guatemala ($18,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y Colombia ($15,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$) registran promedios anuales muy superiores al límite recomendado por la OMS, evidenciando así un nivel de incumplimiento asociado a una exposición crónica que puede representar un riesgo para la salud pública. (Monsalve, 2023).

Colombia no es ajeno a esta problemática, según el Informe del Estado de la Calidad del Aire (2023), correspondiente a su undécima entrega, el país cuenta con 209 estaciones de monitoreo pertenecientes a los Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire (SVCA), con un incremento notorio en las estaciones automáticas, lo que implica una mejor accesibilidad, control y distribución de los datos recolectados por las estaciones. Con la implementación de estos SVCA, se busca cumplir con los objetivos intermedios 3 (OI-3) en los que se pretende alcanzar valores de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente para PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$, con la finalidad de adoptar temporalmente para el año 2030, los valores recomendados por la OMS que corresponden a niveles de inmisión anuales de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. Este informe indica que el contaminante con mayor relevancia fue el material particulado, debido a que ha alcanzado un mayor número de excedencias normativas y se asocia en mayor índole a efectos dañinos en la salud humana. Para el año 2023 para el $\text{PM}_{2.5}$ la distribución porcentual de datos aplica para una categoría ICA “Buena” con un 91.7%, Respecto al $\text{PM}_{2.5}$ En general, los resultados de la ponderación de la proporción del ICA por categoría evidenciaron un mayor riesgo para la salud humana con respecto al PM_{10} , ya que la calidad del aire refirió una categorización “Buena” en una proporción promedio del 42,6 % y “Aceptable” en una mayor proporción del 56,3 %. (IDEAM, 2024)

Retomando lo anterior, según el IDEAM (2024) el $\text{PM}_{2.5}$ es el contaminante de mayor preocupación en el país, ya que se emite en grandes cantidades por el transporte y la industria, y puede penetrar fácilmente en las vías respiratorias transportando compuestos dañinos para la salud, además, destaca un incremento del monitoreo de este contaminante debido a sus excedencias normativas y la necesidad que implica cumplir este requerimiento legal, sumado a el interés asociado a su impacto en la salud. Las zonas de más sufren el efecto de la contaminación atmosférica son “el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, las localidades de Puente Aranda, Carvajal y Kennedy en Bogotá, el municipio de Ráquira en Boyacá y la zona industrial de ACOPI en el municipio de Yumbo (Valle del Cauca)”. Ciudades como Bogotá han presentado altos niveles de contaminación atmosférica originada mayormente por procesos de combustión de fuentes móviles, un mal estado en las vías e incidentes como incendios forestales que además transportan consigo otros agentes de riesgo (Medina & Edna, 2019).

Como es evidente, la CA en Colombia es un problema ambiental de interés que ha generado afectaciones notables sobre la población, sobre todo en aquellas con urbanizaciones extensas que enfrentan constantes problemáticas relacionadas a mala calidad del aire, por ello, se han desarrollado políticas y normas, así como estrategias de intervención. En materia de legislación existe la resolución 2254 de 2017 por la cual “se establece la norma de calidad del aire o nivel

de inmisión y adopta disposiciones para la gestión del recurso aire en el territorio nacional para garantizar un ambiente sano y minimizar el riesgo sobre la salud humana” (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017), en conjunto con legislaciones previas como la resolución 909 de 2008 por la cual se establecen las normas y estándares de emisión admisibles de contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas y se dictan otras disposiciones y la resolución 910 de 2008 por la cual se reglamentan los niveles permisibles de emisión de contaminantes que deberán cumplir las fuentes móviles terrestres.

Respecto a las estrategias a implementar, el CONPES 3943 aprobado por el Consejo Nacional Ambiental como política para el mejoramiento de calidad del aire, este mismo indica que “en el país, la contaminación del aire es mayor en las principales ciudades, como por ejemplo en Bogotá, donde el aporte de los vehículos a las emisiones es del 78%. Por su parte, en Medellín, el 81 % de las emisiones de partículas proviene de los vehículos que, sumado a las características geográficas y del clima, ocasionan episodios críticos de contaminación del aire. En contribución se puede considerar el CONPES 3918 de 2018, en el que se establecieron metas y estrategias para el cumplimiento los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) para el año 2030 donde destacan los ODS 3.9 (Salud y Bienestar) y 11.6 (Ciudades y comunidades sostenibles) donde se hace referencia a la calidad del aire (DNP, 2018).

En Medellín, según el informe de calidad del aire realizado por la universidad EAFIT para el año 2021 realizado bajo el proyecto Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá (SIATA), implementado como estrategia para la reducción, gestión y manejo de eventos críticos asociados a riesgos por eventos de calidad del aire se determinó que respecto al $PM_{2.5}$ la gran mayoría de estaciones presentaron valores de ICA equivalentes a la clasificación aceptable (amarillo), seguido por ICA bueno (verde). Respecto al PM_{10} la mayoría de estaciones presentaron valores de ICA equivalentes a calidad de aire buena (verde), excepto en las estaciones dos estaciones (Éxito de San Antonio y estación de policía Los Gómez), en las cuales se registró un porcentaje significativo de días con ICA correspondiente a calidad de aire moderada (amarillo), además destacan que ninguna estación de monitoreo PM_{10} registro una calidad de aire dañina a la salud de grupos sensibles o dañina a la salud de toda la población (Ramírez Naranjo, 2022).

Respecto a Bogotá, por parte de la secretaria de Ambiente y la gobernación en acciones como la actualización en la flota de buses del transporte masivo Transmilenio, contratos sociales en el plan de desarrollo 2020-2024 con enfoque en calidad del aire, renovación de jardines botánicos para bloqueo de material particulado, entre otros. Según un artículo de Judith Ramírez (2021) publicado en la web de la alcaldía de Bogotá, la Alcaldía de Bogotá firmó el pacto ‘*#Unidos Por Un Nuevo Aire Pactemos por Bogotá*’. Propone estrategias integrales, inversiones priorizadas y medidas específicas para lograr metas: a 2030 reducir la concentración de material particulado $PM_{2.5}$ en un 16.6 % y de PM_{10} en un 14.2 %; además, reducir las toneladas de este contaminante emitidas por las diversas fuentes de contaminación en un 22 % para $PM_{2.5}$ y del 17 % para PM_{10} .

Esta información no es ajena a la situación no ajena al foco de estudio, Jamundí puesto a que actúa como punto de referencia respecto al comportamiento de los niveles de contaminación en el municipio, compartiendo características relacionadas la población, sus dinámicas de transporte y los principios de actividad que se pueden evidenciar. El crecimiento poblacional por lo general implica urbanización, aunque por lo general esta es llevada de manera controlada buscando reducir los impactos relacionados a nivel ambiental, cuando esta es llevada sin una gestión

adecuada puede presentar notorias problemáticas ambientales entre las que se encuentran la contaminación del aire, deterioro de suelos y zonas verdes, motorización, generación de residuos, entre otros, afectando las condiciones de salud de los habitantes. Son las condiciones ambientales a las que se ve expuesta una población una de las determinantes de su calidad de vida. Bajo este foco, destaca entonces el deterioro en la calidad del aire debido a las evidenciadas afecciones a la salud con las que se le relaciona (Barrios Casas y otros, 2004).

Aunque el municipio de Jamundí se desarrolló en sus inicios bajo un modelo de actividad agroindustrial y carbonífera, en la actualidad se ha convertido en una de las principales localidades para el desarrollo urbanístico presentando un aumento poblacional relativamente acelerado (Alcaldía Municipal de Jamundí, 2021). Esto, entre múltiples razones se debe a que cuenta con condiciones aptas para el desarrollo económico y social, así como la elevada disponibilidad territorial que facilita la expansión del municipio, factor que se ve influenciado además debido a la alta demanda de vivienda de las poblaciones ubicadas en localidades vecinas. Este aumento poblacional ha traído consigo un alza en industrialización y motorización, fuentes que representan un aumento en la contaminación atmosférica debido a las emisiones que generan. (Avellaneda Tamayo, 2023).

Según el Informe del Estado de la Calidad del Aire en Colombia de 2022 en donde se registran valores puntuales para el municipio de Jamundí, se obtuvieron niveles de concentración promedio para un periodo de exposición anual con concentraciones de $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ PM_{10} , dicho valor no supera lo recomendado por la OMS y es permisible según la resolución 2254 del 2017 ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$), mientras para $\text{PM}_{2.5}$, no se registraron resultados puntuales en este informe. No obstante, mediante el registro plataforma del IDEAM para este informe (2022), el departamento del Valle del Cauca se presenta una concentración promedio anual por debajo de $13.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con referencia a la estación de vigilancia las Américas, la cual es a su vez la que presenta los registros más elevados. Este valor como referencia, está dentro de lo permisible en la resolución 2254 del 2017 ($25 \mu\text{g}/\text{m}^3$), y cumple con lo recomendado por la OMS.

Por otro lado, el informe anual de calidad del aire de 2023 (publicado en enero de 2024) presentado por la Corporación Regional del Valle del Cauca (CVC), en cumplimiento de las funciones de prevención, control y vigilancia de la calidad del aire se registró que en Jamundí la concentración PM_{10} promedio mensual fue de $35.20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que $\text{PM}_{2.5}$ presenta una concentración promedio mensual de $13.20 \mu\text{g}/\text{m}$ por lo que no se tiende a exceder la norma, mientras que el Índice de Calidad del Aire (ICA) presenta en algunos días una calidad del aire aceptable, esto indica que pueden presentarse posibles síntomas respiratorios en poblaciones sensibles o con problemas respiratorios. La zona centro de Jamundí cuenta con aproximadamente 123.615 habitantes en la cabecera municipal según el censo del 2018 de y las proyecciones municipales del DANE. Esta población está expuesta a concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10} que, aun cuando pueden cumplir la normativa nacional impuesta, también pueden alcanzar y/o superar los valores guía de la OMS, los cuales se asocian con incrementos en morbilidad y mortalidad (Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2019). Informes provistos por el IDEAM evidencian que la fracción de eventos de salud atribuibles a la contaminación por PM en Colombia es significativa, por lo que la población residente y flotante del centro urbano de Jamundí constituye un grupo relevante para efectuar acciones de que permitan el control y mitigación de los efectos por la contaminación.

3. Justificación

Debido a las afecciones que representa para la salud pública y el medio ambiente, en conjunto de factores como la creciente de conciencia ambiental y las exigencias de las instituciones presentadas en cualquier localidad, se vuelve necesario un control y una gestión adecuada de las condiciones de calidad del aire a las que se ve expuesta la población, dado que los impactos negativos que genera ponen en riesgo su bienestar. Por esta razón es de carácter prioritario el planteamiento de estrategias y la implementación de políticas para combatir la contaminación del aire, siendo impulsadas por organismos internacionales como la Organización Mundial de la Salud (OMS) y/o organismos internos propios de las naciones cuyo objetivo es alcanzar acciones beneficiosas para el medio ambiente mitigando el cambio climático y reduciendo la morbilidad asociada a la salud. (OMS, 2020). En Colombia, la protección ambiental representa un factor importante en la inversión de capital del país, la contaminación atmosférica y el monitoreo de la calidad del aire hace parte del conjunto de intereses sobre los cuales se realizan investigaciones e intervenciones buscando reducir los niveles de contaminación buscando proteger el medio ambiente y la salud poblacional. La gobernación colombiana en términos generales, busca mejorar la calidad del aire en las zonas urbanas más afectadas por el material particulado, para ello, ha diseñado estrategias enfocadas en reducir este contaminante y ha establecido planes de desarrollo que incrementen el cumplimiento de los parámetros de calidad del aire nacionales e internacionales, siguiendo los estándares de la Organización Mundial de la Salud (OMS) y promoviendo una gobernanza ambiental (Ministerio de Transporte, 2019).

Jamundí es un municipio intermedio de Valle del Cauca, se caracterizó históricamente por su actividad agronómica. Sin embargo, en la actualidad presenta una transformación dirigida a una “ciudad dormitorio”. Impulsada por la construcción de viviendas, la rápida inserción de sectores productivos y el desarrollo social como económico en alza, han llevado a un incremento significativo en la población acompañado de un aumento en las fuentes móviles y de la actividad industria (Lopez Restrepo, 2021). A consecuencia de lo último, se ha presentado un incremento en las emisiones, particularmente de material particulado, lo que afecta la calidad del aire. Esta problemática medioambiental afecta el bienestar de los habitantes y visitantes de la localidad, especialmente aquellos que residen en la zona central y están expuestos en jornadas prolongadas de hasta 12 horas, como referencia a las jornadas laborales evidenciadas en la localidad. Esta exposición prolongada representa en definitiva un riesgo crítico para la salud, como se evidencia en el informe de calidad del aire 2022 de la CVC, en el cual se reporta una calidad del aire de tipo “aceptable”.

Según su Plan Básico de Ordenamiento Territorial (PBOT), Jamundí enfrenta un deterioro creciente de sus recursos naturales dado las actividades de explotación minera, hídrica, agropecuaria y el desarrollo urbanístico, el cual ha sido un factor clave en su desarrollo actual. Cuenta con más de 35 industrias en su zona plana (cabecera municipal), una población flotante estimada de 20.000 personas por semana (Alcaldía Municipal de Jamundí, 2002). Por su parte, el municipio adopta su PBOT por el acuerdo 002 de 2002, indicando dos artículos referentes a la gestión de la calidad del aire, el artículo 392 por el cual se adoptan los estudios producidos por la CVC y propenderán de su actualización anual en relación a la calidad del aire, y el artículo 396 donde se indica que se coordinara con la autoridad competente para la realización de mínimo una vez al año estudios de calidad del aire en zonas de alto tráfico vehicular para determinar el

impacto de las emisiones por fuentes móviles. Este contexto, plantea una situación crítica con riesgos potenciales para la calidad del aire y la salud de la población, incentivando así la necesidad de adoptar iniciativas que permiten gestionar estos impactos.

Bajo este enfoque y debido a la importancia que radica sobre el conocimiento de la calidad del aire y las perspectivas de acción frente a las dificultades ambientales y en salud humana que se evidencian en la actualidad, se pretende identificar y monitorear las concentraciones de material particulado PM10 y PM2.5 a las cuales se ven expuestas las poblaciones en diferentes ubicaciones de la localidad central de Jamundí para determinar el riesgo a la exposición y las posibles implicaciones que esta puede representar para la salud de la comunidad y el medio ambiente. Este trabajo repercutirá en el apartado social como un beneficio para la comunidad como componente informativo sobre las condiciones registradas, la comprensión de los contaminantes y la relevancia de la calidad del aire en función de sus efectos en la salud y el ambiente, permitiendo a la comunidad apropiarse de un conocimiento clave que promueva su participación ante las situaciones que se puedan evidenciar. Los hallazgos obtenidos también se ofrecen para el sector institucional como una revisión del cumplimiento normativo o soporte de análisis, e insumo con el cual puede disponer de la información para el actuar en la formulación de estrategias de ordenamiento territorial y alternativas relacionadas a la mejora en la calidad de vida de los habitantes.

4. Objetivos

4.1. Objetivo General:

- Evaluar la calidad del aire mediante el componente de material particulado PM_{10} y $PM_{2.5}$ en la zona urbano central del municipio de Jamundí.

4.2. Objetivos específicos:

- Determinar el comportamiento de las concentraciones del material particulado PM_{10} y $PM_{2.5}$ en la zona urbano central de la localidad de Jamundí.
- Identificar la percepción de la población respecto a la calidad del aire presente en la localidad.
- Estimar la exposición al material particulado PM_{10} y $PM_{2.5}$ de la población presente en las zonas de estudio.

5. Marco teórico

5.1. Contaminación atmosférica

La globalización, el auge de los avances tecnológicos e industriales son sucesos que han facilitado la progresión y mejorado la calidad de vida de la humanidad de sus vidas, sin embargo, como consecuencia indirecta de estas acciones se vulnero al medio ambiente, empeorando las condiciones en las que se encuentra al ingresar sustancias y agentes en concentraciones dañinas para el medio ambiente. Aunque inicialmente no se consideró la afectación al medio ambiente dentro de este accionar, la contaminación ambiental representa un riesgo para la salud humana y finalmente una causante de enfermedad en los seres vivos, en vista de que la condición en la que se encuentra sigue empeorando por causas derivadas de la actividad humana se convirtió en un problema cuya afectación es mundial. La relación de causalidad entre los factores ambientales y la salud humana es directa, es la determinación de la exposición que representa un riesgo la que se encuentra como sujeto de múltiples estudios a nivel internacional (Vargas Marcos, 2005).

La contaminación atmosférica se da por un aumento en las concentraciones de agentes presentes en el aire de manera irregular cuyos niveles representan un riesgo para la salud humana, este aumento en la concentración se atribuye a contaminantes criterio como el material particulado, óxidos de azufre, dióxidos de nitrógeno, ozono troposférico y monóxido de carbono, los cuales son productos de la combustión de hidrocarburos provenientes en su gran mayoría de fuentes fijas, compuestas por aquellas que no presentan variación espacial y móviles, compuestas por el parque automotor (Manisalidis y otros, 2020). El material particulado que hace parte de estos agentes suele emplearse como determinante de la calidad del aire debido a que se ha evidenciado como el principal causante de las enfermedades respiratorias y cardiovasculares en entornos urbanos (Romero y otros, 2010).

5.2. Fuentes de contaminación atmosférica

La CA tiene su origen en diferentes fuentes, aunque existen aportes de fuentes biogénicas, es decir propias de la naturaleza, en la actualidad las principales surgen de la actividad antropogénica, es decir la actividad humana. Según el quinto informe de evaluación del IPCC, las emisiones de gases efecto invernadero (GEI) proceden esencialmente de 5 sectores: energía, industria, transporte, agricultura y residuos. El transporte representa el 23% al 25% del total de emisiones directas de CO₂, el sector agrícola y de uso de la tierra representa el 24% de las emisiones globales de GEI, sumo a esto factores como la degradación de la tierra y suelos, la deforestación, entre otros asociados, se estima que el valor puede aumentar. La generación de energía y la industria representan el 40% de las emisiones globales, el restante corresponde a las fuentes asociadas a la gestión de residuos y las fuentes residenciales (IPCC, 2014).

Es posible categorizar estas fuentes según su distribución espacial, las fuentes fijas o puntuales son aquellas que se encuentran en un punto determinado, suelen asociarse a industrias y fábricas. También se pueden asociar con las fuentes de área, estas son aquellas que afectan la calidad del aire en una distribución concreta, suelen asociarse a comercio, agricultura y ganadería, vehículos no transitorios, entre otras. Las fuentes móviles son todas aquellas que no cuentan con una localización fija, esta abarca todos los medios de transporte que emplean combustibles fósiles y transitan y las fuentes naturales y/o difusas, las cuales se asocian a eventos y fenómenos propios de la naturaleza (Manisalidis y otros, 2020).

En estudios sudamericanos, se identifican seis fuentes claves de PM; el tráfico, debido a emisiones directas y desgaste en frenos y neumáticos; la industria, con aportes desde plantas energéticas hasta actividades portuarias; la quema de combustibles, como leña o carbón; y fuentes naturales como el polvo de los suelos o incluso la sal marina. A estas se les suman las partículas secundarias, originadas por reacciones químicas de gases contaminantes como NO₂, SO₂, entre otros. En ciudades como Santiago de Chile o Sao Paulo, el tráfico y la industria suelen superar el 60% de las emisiones totales de PM (Karagulian y otros, 2015).

5.3. Contaminantes criterio

Los contaminantes criterio son aquellos que cuentan con concentraciones máximas permitidas o recomendadas debido a sus efectos en la salud y el medio ambiente, su determinación es dada por normativas mundiales como la propuesta por la OMS o por normativas nacionales como la dispuesta en Colombia por la resolución 2254 del 2017, esta última atiende las recomendaciones planteadas como guía por la OMS. En la tabla 1 se pueden observar los contaminantes criterio en Colombia en contraste con las recomendaciones de la OMS (IDEAM, 2020).

Tabla 1. Contaminantes criterio según resolución 2254 del 2017 en contraste con las recomendaciones de la OMS

Contaminante ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Res. 2254 de 2017	Valor guía OMS	Tiempo de exposición
PM_{10}	50	20	Anual
	75	50	24 horas
$PM_{2.5}$	25	10	Anual
	37	25	24 horas
SO_2	50	20	24 horas
	100	-	1 hora
NO_2	60	40	Anual
	200	-	1 hora
O_3	100	100	8 horas
CO	5.000	-	8 horas
	35.000	-	1 hora

Fuente: Tomado de Informe de Calidad del Aire de Colombia (IDEAM, 2020).

5.4. Índice de calidad del aire

El Índice de Calidad del Aire (ICA) es un valor adimensional comúnmente empleado para reportar de forma clara y sencilla al público el nivel de contaminación atmosférica en un momento dado y sus posibles efectos sobre la salud, sus distinciones a partir de un código de colores están asociadas a unos efectos generales que deben ser tenidos en cuenta para reducir la exposición a altas concentraciones por parte de la población (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).

A continuación, se presenta la descripción del ICA descrita por la resolución 2254 de 2017 (Tabla 2):

Tabla 2. Descripción del Índice de Calidad del Aire

Rango ICA	Color	Estado de la calidad del aire	Efectos sobre la salud
0 – 50	Verde	Buena	La contaminación atmosférica supone un riesgo bajo para la salud.
51 – 100	Amarillo	Aceptable	Posibles síntomas respiratorios en grupos poblacionales sensibles.
101 – 150	Naranja	Dañina a la salud de grupos sensibles	Los grupos sensibles pueden presentar efectos sobre la salud. Ozono troposférico: personas con enfermedades pulmonares, niños, adultos mayores y quienes realizan actividad física al aire libre. Material particulado: personas con enfermedad cardíaca o pulmonar, adultos mayores y niños son más vulnerables.
151 – 200	Rojo	Dañina para la salud	La calidad del aire es dañina para la población en general. Los grupos sensibles experimentan efectos más graves para la salud.
201 – 300	Púrpura	Muy dañina para la salud	Estado de alerta: todos pueden experimentar efectos más graves para la salud.
301 – 500	Marrón	Peligroso	Advertencia sanitaria: toda la población puede presentar efectos adversos graves en la salud humana y está propensa a verse afectada por impactos severos.

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

La resolución también establece puntos de corte específicos para los contaminantes criterio según el Índice de Calidad del Aire (ICA). Para las concentraciones de PM10 y PM2.5 en un periodo de exposición de 24 horas, se toman como referencia los siguientes valores:

Tabla 3. Puntos de corte del ICA

ICA	Color	Categoría	PM ₁₀ (µg/m³)	PM _{2.5} (µg/m³)
0 – 50	Verde	Buena	0 – 54	0 – 12
51 – 100	Amarillo	Aceptable	55 – 154	13 – 37
101 – 150	Naranja	Dañina a la salud de grupos sensibles	155 – 254	38 – 55
151 – 200	Rojo	Dañina a la salud	255 – 354	56 – 150
201 – 300	Púrpura	Muy dañina a la salud	355 – 424	151 – 250
301 – 500	Marrón	Peligrosa	425 – 604	251 – 500

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

5.5. Material particulado

Dentro del apartado de la contaminación ambiental se reconoce la contaminación por partículas o material particulado (PM) a aquellas sustancias solidas o liquidas (algunas definiciones también consideran la presencia de gases en la definición del PM) que se encuentran suspendidas en el aire sin sedimentarse en periodos cortos de tiempo, caracterizadas por su gran aporte al deterioro a la calidad del aire y su elevada generación problemas de salud (EPA, 2015). Estas partículas se encuentran en diferentes tamaños y formas, aunque esta puede variar debido a procesos físicos y químicos ocurridos en el ambiente, son una mezcla diferentes elementos y/o sustancias que además tienen la capacidad de interactuar entre ellas formando nuevos compuestos (Arciniégas Suárez, 2012). Según Ramírez Naranjo (2022) también existen el material particulado secundario el cual no es emitido directamente, sino que se forma de la reacción de otros contaminantes en la atmosfera, “Siendo así, el PM secundario se deriva de la oxidación de una variedad de gases orgánicos e inorgánicos donde el SO₂ y el NO resultan ser los precursores más predominantes.”

Algunos de los elementos y compuestos formados que se categorizan como contaminantes presentes en el PM son los siguientes (Watson & Chow, 2000):

- Materiales geológicos como óxidos de Al, Si, Ca, Fe, Ti y otros óxidos de metales presentes mayormente en el PM grueso.
- Compuestos de carbono orgánico y elemental (hollín).
- Compuestos nitrificados como el Nitrato de amonio (NH₄NO₃), Amoniac (NH₃), Ácido nítrico (HNO₃), Nitrato de sodio (NaNO₃), entre otros derivados.
- Compuestos sulfatados como el Sulfato de amonio [SO₄(NH₄)₂], Ácido sulfúrico (H₂SO₄), entre otros derivados.

- Algunas sales como Cloruro de sodio (NaCl) y otros elementos o compuestos solubles que absorben vapor de la atmosfera como el K, Ca, entre otros mayormente presentes en zonas cercanas al mar.

Pese a estas características, su categorización es realizada en base a su diámetro aerodinámico el cual, según el Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (2006), es el diámetro de una esfera de densidad 1 g/cm³, que tiene la misma velocidad de sedimentación que la partícula.

Se distinguen entonces tres tipos de material particulado, el PM₁₀ correspondiente a partículas cuyo diámetro es inferior a 10 micrómetros conocido como material particulado grueso, el PM_{2.5} correspondiente a partículas cuyo diámetro es inferior a 2.5 micrómetros y el PM_{1.0} correspondiente a partículas cuyo diámetro es inferior a 1 micrómetro, en este apartado también se considera el PM_{0.1} y se realiza la medición sobre nanómetros. De estos, es el PM_{2.5} el indicador estrella empleado para la calidad de aire debido a la facilidad que tiene de ingresar al organismo hasta el torrente sanguíneo donde se presenta afecciones más graves a la salud.

En la figura 1 se puede observar la distribución de elementos encontrados en el material particulado.

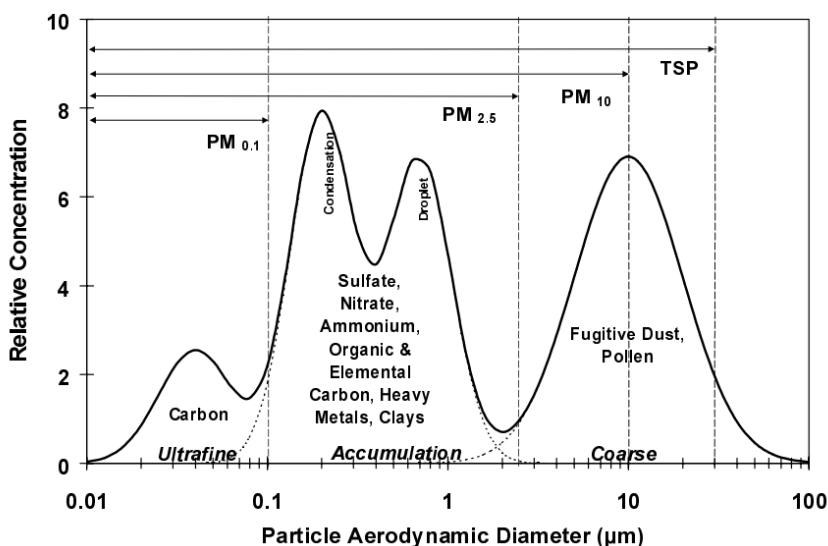


Figura 1. Distribución típica de partículas en la atmósfera

Fuente: Tomado de Watson & Chow (2000).

5.6. Sensores ópticos para determinación de la calidad del aire

La medición de la contaminación del aire se hace mediante dispositivos que cuantifican en un área circundante la presencia compuestos o elementos mediante múltiples sensores calibrados que reconocen su presencia. Estos pueden ser ópticos, electroquímicos y multiparamétrico. Para la lectura de PM se suelen emplear sensores ópticos los cuales detectan y cuantifican las partículas de diferente tamaño que pasan a través de una célula de manera controlada mediante los principios de dispersión de la luz empleando un láser que funciona como fuente de luz de alta intensidad y un fotodetector que es sensible al paso de esta luz y mide su dispersión (Shepard, 2022). En la figura 2 se evidencia este principio.

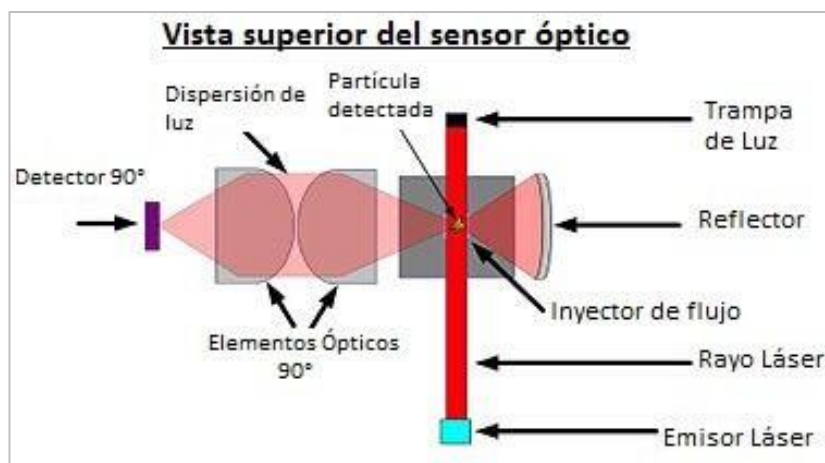


Figura 2. Principio de funcionamiento de sensor óptico

Fuente: Tomado de Tecnometrica (2019)

Los dispositivos de medición de la calidad del aire pueden ser fijos o móviles, dependiendo de su instalación y operación. Entre los móviles, se encuentran los conocidos como sensores ópticos. Estos dispositivos inicialmente eran empleados para el monitoreo de calidad de aire en interiores, con el paso de los años han destacado, ganando relevancia debido a la factibilidad económica que representan frente a los fijos, dando lugar al desarrollo de dispositivos de menor costo con la capacidad para registrar contaminantes criterios empleados para la revisión de la calidad del aire además de variables meteorológicas de gran importancia en la determinación de calidad del aire (García Navarrete & Rico Soto, 2019). Estos finalmente pueden ser empleados con mira a la creación de redes ciudadanas para el monitoreo de la calidad del aire.

5.7. Sistemas de Vigilancia de Calidad del Aire (SVCA)

Los SVCA son el conjunto de equipos empleados como herramientas para el monitoreo de la calidad del aire por parte de los contaminantes atmosféricos, estos establecen estrategias y se integran en localizaciones determinadas buscando cumplir las normativas planteadas por las entidades de control correspondientes en base en el índice de calidad del aire. Entre sus acciones se encuentra la observación, seguimiento, medición, evaluación y control de los fenómenos de contaminación del aire, para ello cuentan con manuales de operación y diseño los cuales estipulan para la localidad que les corresponda (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

Según el IDEAM (2020), Colombia cuenta con una cobertura en 80 de sus municipios para un total de 175 estaciones de monitoreo, de estas tan solo 11 SVCA se encuentran acreditados por el IDEAM bajo la norma NTC-ISO/IEC 17025 y el decreto 1076 del 2015, presentes como autoridades ambientales en el país, en la figura 3 se observan los estos SVCA.

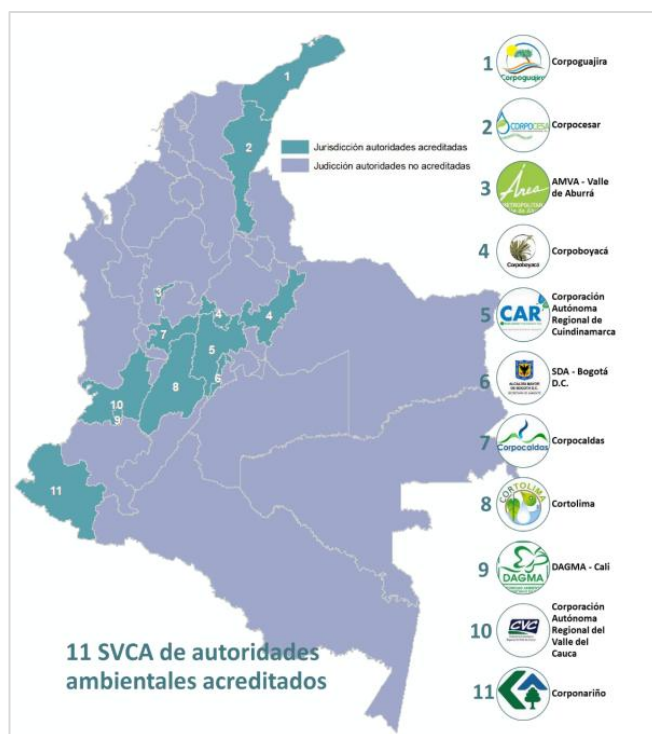


Figura 3. Autoridades ambientales con SVCA acreditados por el IDEAM

Fuente: Tomado de Informe de Calidad del Aire de Colombia (IDEAM, 2020).

5.8. Análisis de la exposición

La dosis de exposición puede definirse como la cantidad específica de un contaminante, que, tras haber estado en contacto con el organismo, traspasa barreras biológicas y alcanzando tejidos donde se puede ejercer un efecto adverso, esta definición depende de tres parámetros; la magnitud (concentración), duración (tiempo de contacto) y la frecuencia (repetición de la exposición), la combinación de dichos factores determina la cantidad de contaminante que ingresa al organismo, y por lo tanto, su potencial impacto en la salud (Ken & P, 1988).

La exposición, a su vez, depende de diversos factores, tales como la ingesta, la intensidad, el tiempo, el oficio, los factores detonantes, las áreas expuestas, las rutas de exposición, entre otros. Su determinación hace posible la contabilización de efectos y asociación de sucesos que actúan como fenómenos causantes de enfermedades con mayor exactitud (Espinosa y otros, 2005). En este sentido, la cuantificación de la exposición consiste en determinar la magnitud, frecuencia y duración de las exposiciones con que los individuos de una población están expuestos a través de vías significativas, una vez estas exposiciones ocurren de forma periódica o prolongada, se habla de una dosis de suministrada (Moya, 2004).

Los métodos utilizados para evaluar la exposición combinan mediciones directas, con dispositivos personales que registran en tiempo real las concentraciones de contaminantes inhalados, con métodos indirectos que ponderan las concentraciones medidas en microambientes específicos (hogares, lugares de trabajo, vías públicas) por el tiempo que las personas pasan en ellos. Estos modelos emplean ecuaciones que integran la concentración promedio en cada

microambiente con la duración del contacto, obteniendo así una exposición integrada ponderada en el tiempo (Ken & P, 1988).

Según el manual de factores de exposición de la EPA (2011) se pueden emplear tres enfoques para determinar la exposición:

- Mediante el punto de contacto o método directo en el cual se miden las concentraciones de químicos o contaminantes en el punto origen de exposición respecto al individuo.
- Mediante la evaluación del escenario o método indirecto en el cual se determina concentraciones de químicos o contaminantes con frecuencia y duración en conjunto con las características del escenario.
- Mediante la reconstrucción de la dosis en el cual se determina la dosis a partir del uso de bioindicadores y reacciones en organismos.

El presente estudio adopta un método indirecto (evaluación del escenario), basado en el marco conceptual de ecuaciones de dosis-exposición, que permite calcular una dosis potencial de inhalación al considerar la concentración ambiental, la tasa de inhalación, derivada de tablas estandarizadas según edad y nivel de actividad y el tiempo de exposición de los individuos en la zona de estudio (EPA, 2011).

6. Metodología

6.1. Modelo de estudio

Para este trabajo fue empleado un modelo de estudio descriptivo y exploratorio, debido a la necesidad de evidenciar e identificar la calidad del aire en la zona de estudio, y, en adición, comprender con mayor profundidad la percepción de los habitantes al respecto. De esta manera, se busca analizar los factores que contribuyen a la contaminación como aquellos que influyen en la percepción de la comunidad, proporcionando mejor percepción de la problemática ambiental. En este sentido, se espera obtener como resultado una evaluación justa y representativa de los elementos determinantes en la calidad del aire para la zona urbano central de Jamundí, contribuyendo a la mejora en la calidad de vida de los habitantes y al desarrollo sostenible del municipio con una promoción de acciones para la gestión ambiental con estrategias de mitigación y sensibilización ambiental.

6.2. Localización de la zona de estudio

El municipio de Jamundí (figura 4) es uno de los 42 municipios de Colombia, se encuentra ubicado al sur del departamento del Valle del Cauca a 12 Km de la ciudad de Santiago de Cali sobre las coordenadas de Latitud: 3.26289 (3° 15' 46" Norte), Longitud: -76.5384 (76° 32' 18" Oeste.) Cuenta con un territorio de 57.700 Ha que corresponden a 14.630 Ha de territorio plano y 43.070 Ha de cordillera. Presenta un área de 522 Km² que se encuentra distribuida entre zona urbana con aproximadamente 13 Km², zona suburbana con 29 Km² y zona rural con 575 Km² (Alcaldía Municipal de Jamundí, 2021).

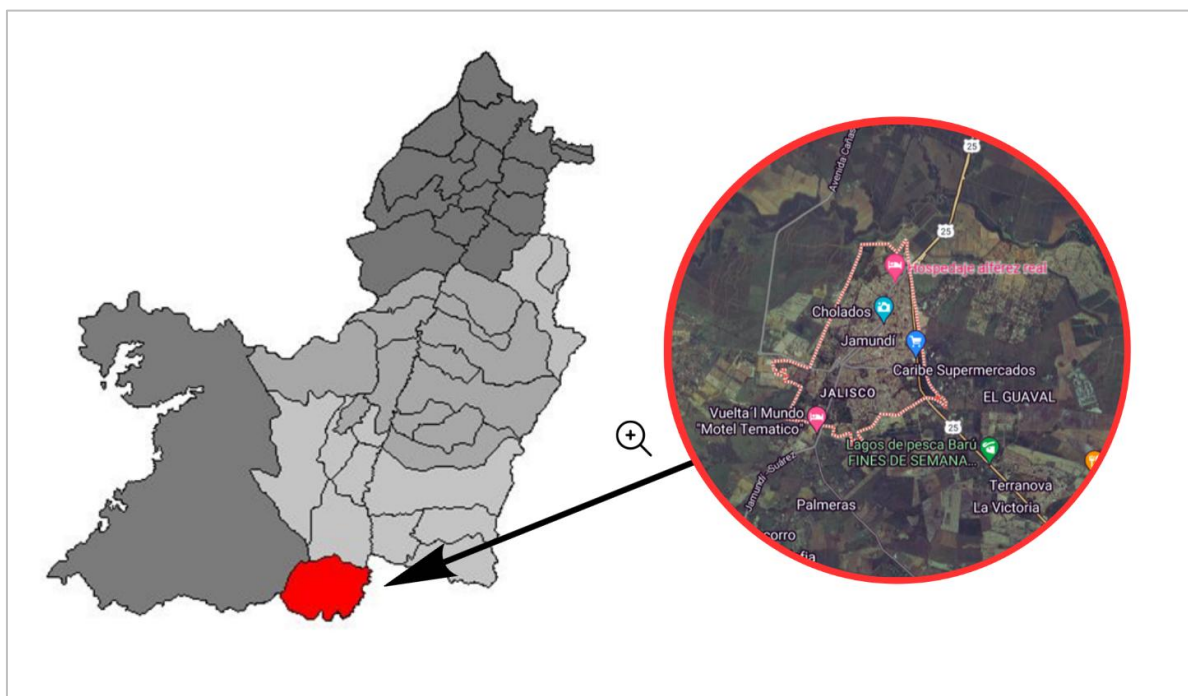


Figura 4. Ubicación del municipio de Jamundí en el departamento del Valle del Cauca.

Fuente: Elaboración propia a partir de Tomado de Alcaldía de Jamundí, s. f y Google Maps, 2023.

En sección derecha de la figura 4 se puede observar la distribución geográfica del municipio desde la perspectiva satelital, limitando al norte con la ciudad de Santiago de Cali, al sur con los municipios de Buenos Aires y Santander de Quilichao (departamento del Cauca), al oriente con los departamentos del Puerto Tejado y Villarrica (departamento del Cauca) y al occidente con el municipio de Buenaventura.

6.3. Localización de los puntos de monitoreo

Para la determinación de la zona de estudio donde se lleva a cabo el muestreo, fueron consideradas las ubicaciones al interior del perímetro urbano central del municipio que presenten una alta concentración de personas, buscando una muestra representativa en función de una exposición prolongada al tránsito de vehículos, estas ubicaciones además coinciden con la zona comercial, que a su vez implica un alto flujo vehicular y peatonal del interior y exterior de la localidad. En la figura 5 se pueden observar las ubicaciones preliminares, determinadas para el muestreo de material particulado.

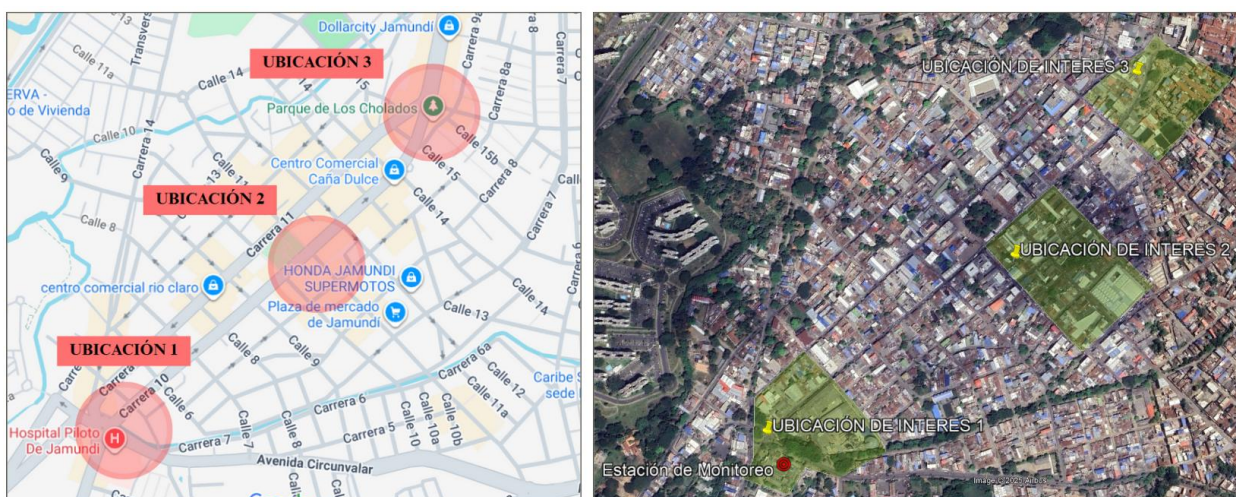


Figura 5. Localización de puntos de muestreo preliminares

Fuente: Tomado de Google Maps, 2025; Google Earth, 2025.

Las ubicaciones identificadas como puntos en la figura 5 corresponden a las siguientes localidades en el municipio:

- Ubicación 1. Hospital piloto de Jamundí.
- Ubicación 2. Zona central comercial, parque de Jamundí.
- Ubicación 3. Monumento de la vida Jamundí, lateral del antiguo Parque de los Cholados.

Tras realizar una inspección visual orientada a identificar el flujo vehicular y peatonal, sumado al alto volumen de tránsito, la gran cantidad de establecimientos que pueden influir en la calidad del aire dada la presencia de actividades de preparación de alimentos y obras de construcción se determinó que la ubicación número 2 corresponde a la zona con mayor volumen de tránsito. Este corresponde a la calle 11, identificada como una de las principales localidades comerciales en el centro de Jamundí. Adicionalmente, dado a que la ubicación corresponde a una zona de alta demanda en el área comercial, los visitantes y residentes permanecen durante periodos

prolongados, lo cual favorece la idea de encontrar una población prioritaria que pueda verse afectada por exposiciones más largas y/o constantes.

Una vez decidida la ubicación, se optó por realizar el muestreo de la calidad del aire a lo largo del corredor vial de la zona comercial, de esta manera fueron seleccionados 8 puntos estratégicos dentro de la zona de estudio (ver tabla 2) con el objetivo de obtener una versión representativa de las condiciones ambientales en la zona. Los puntos de muestreo se encuentran en las intersecciones de las calles, permitiendo abarcar una mayor extensión y evaluar con una mayor variabilidad las variables de calidad del aire.

La distribución espacial, donde se detallan las ubicaciones específicas de los puntos de muestreo se observa en la Figura 6.



Figura 6. Localización de puntos de muestreo

Fuente: Tomado de Google Earth, 2024.

A continuación, se observan los puntos de muestreo de manera individual, en la posición de referencia donde se realizan las mediciones y, por ende, en el lugar donde se registraron los datos (Figura 7):

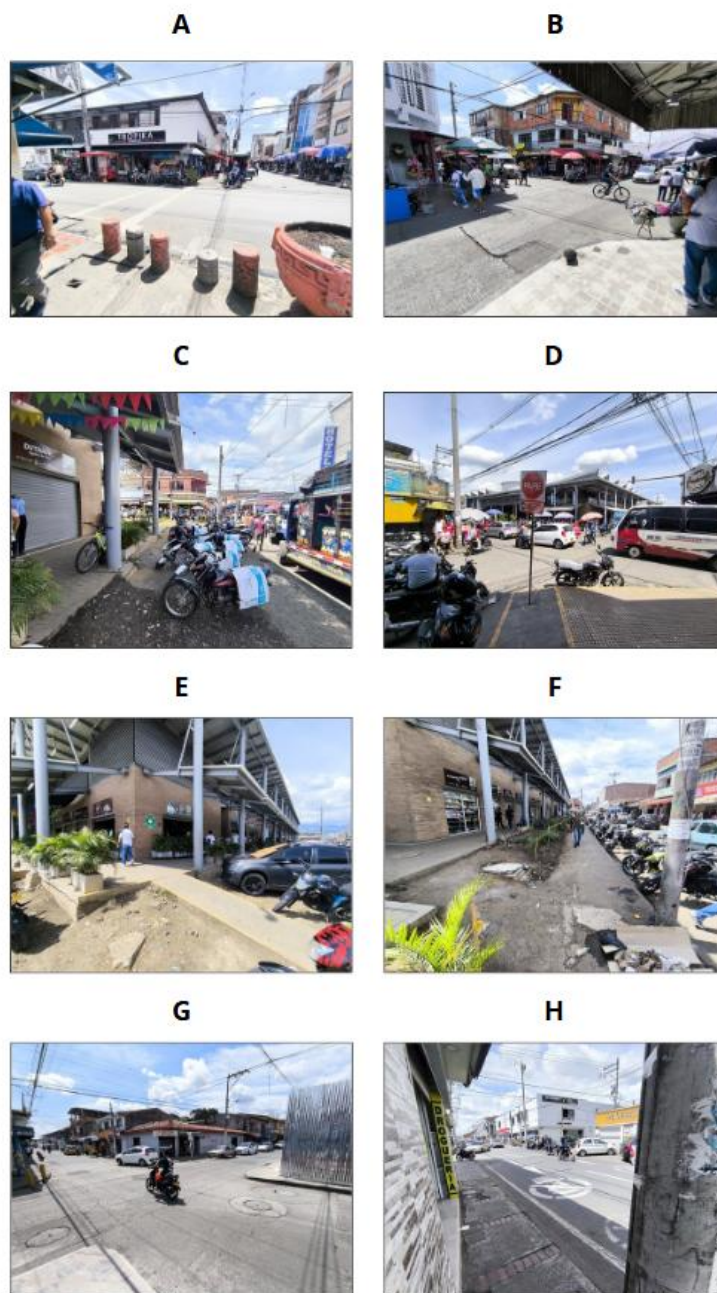


Figura 7. Puntos de muestreo

Fuente: Obtención propia, 2025.

Los puntos de muestreo presentan diferentes condiciones a partir de los sucesos o eventos que ocurren con habitualidad en cada ubicación o factores los cuales se considera pueden afectar las mediciones, como posibles emisiones o condiciones ambientales. En este sentido, en la tabla 4 se presenta la ubicación, coordenadas y una breve descripción de las características identificadas en los puntos de muestreo (previamente identificados) según las condiciones observadas durante las jornadas de muestreo:

Tabla 4. Características de los puntos de muestreo

Punto	Ubicación geográfica de los puntos	Coordenadas (WGS84)	Características de locación
A	Intersección Cra. 10 con Calle 11.	3.261761, -76.540225	Punto con alto tráfico, negocios ambulantes con puestos de asado, salida directa al parque principal de Jamundí con gran cantidad de transeúntes (zona con mayor tránsito de personas).
B	Intersección Cra. 9 con Calle 11.	3.261120, -76.539632	Punto de intersección con alto tráfico vehicular, zona de tránsito de buses intermunicipales (Transur, Líneas del Valle, entre otros), alta cantidad de transeúntes.
C	intersección Cra. 8 con Calle 11.	3.260530, -76.539010	Punto de tráfico vehicular intermedio, zona de llegada y parte de “Chivas”, alta cantidad de polvo en el suelo (zona con moderada cantidad de transeúntes)
D	intersección Cra. 7 con Calle 11.	3.259963, -76.538427	Punto de tráfico vehicular alto, intersección con varios supermercados y punto de transbordo de buses municipales, alta cantidad de transeúntes.
E	Intersección Cra. 10 con Calle 12.	3.260433, -76.537796	Punto de tráfico vehicular bajo, zona de parqueadero para motos y carros particulares, zona con gran cantidad de polvo (sin pavimento en el suelo), baja cantidad de transeúntes.
F	Intersección Cra. 9 con Calle 12.	3.261090, -76.538397	Punto de tráfico vehicular intermedio, zona con puntos verdes, baja cantidad de transeúntes (zona con menor tránsito de personas).
G	intersección Cra. 8 con Calle 12.	3.261725, -76.538966	Punto de intersección con alto tráfico vehicular, zona de tránsito de buses intermunicipales (Transur, Líneas del Valle, entre otros), moderada cantidad de transeúntes.
H	intersección Cra. 7 con Calle 12.	3.262387, -76.539491	Punto con alto tráfico vehicular, cercano a zonas verdes sin muchos transeúntes, ubicado justo al lado a una zona en construcción durante el periodo de mediciones (posibles emisiones de material particulado por obras)

Fuente: Elaboración propia.

6.4. Identificación de fuentes

La identificación de las fuentes emisoras se realizó mediante una inspección visual directa en el área de estudio, durante la cual se reconocieron dinámicas o actividades con el potencial para

generar emisiones de material particulado. En este proceso se logró clasificar de manera preliminar las fuentes según su naturaleza. Destacan las fuentes móviles, dada su presencia constante a lo largo de las calles, donde se identificaron automóviles, buses, mulas, motocicletas y otros vehículos a combustión. Por su parte, se identificaron zonas de interés considerables como fuentes fijas o estacionarias, tales como puntos de ventas callejeras (ambulantes), zonas de cargue de vehículos pesados (bahías) y obras civiles en curso. A continuación, se presentan fotografías donde se visualización los apartados descritos (Figura 8):



Figura 8. Fuentes emisoras fijas y/o estacionarias observadas

Fuente: Obtención propia (2025).

En el registro fotográfico realizado durante la última visita a la zona de estudio, se evidenciaron los puntos previamente mencionados, con una presencia constante de vehículos en toda el área de muestreo, variando su tipo y frecuencia según su localización específica. Esta movilidad incluye automóviles particulares, buses municipales, gualas y transporte informal conocido como “pirata”, muchos de los cuales presentan condiciones de deterioro, emitiendo visiblemente gases de combustión a su paso. Los puntos de venta ambulantes se encuentran distribuidos por todo el sector, no obstante, pocos de ellos muestran emisiones visibles de humo o partículas para clasificarlos dentro de las fuentes de emisión. En cuanto a las zonas de construcción, durante el periodo de muestreo se evidenciaron varias obras, sin embargo, para efectos del análisis únicamente fue considerada la obra realizada cerca al punto B, dado que era la más extensa y por una más evidente presencia de polvo en sus cercanías. Por su parte, en las inmediaciones de la plaza de mercado de Jamundí se encuentran diferentes muelles de carga, en ellos operan vehículos pesados para el transporte de alimentos y otras mercancías, como también se encuentran los muelles de transbordo donde se ubican los buses municipales y otros vehículos para transporte de personas.

A continuación, se presenta la distribución de las fuentes emisoras identificadas en el área considerando los apartados generación de material particulado (Figura 9):

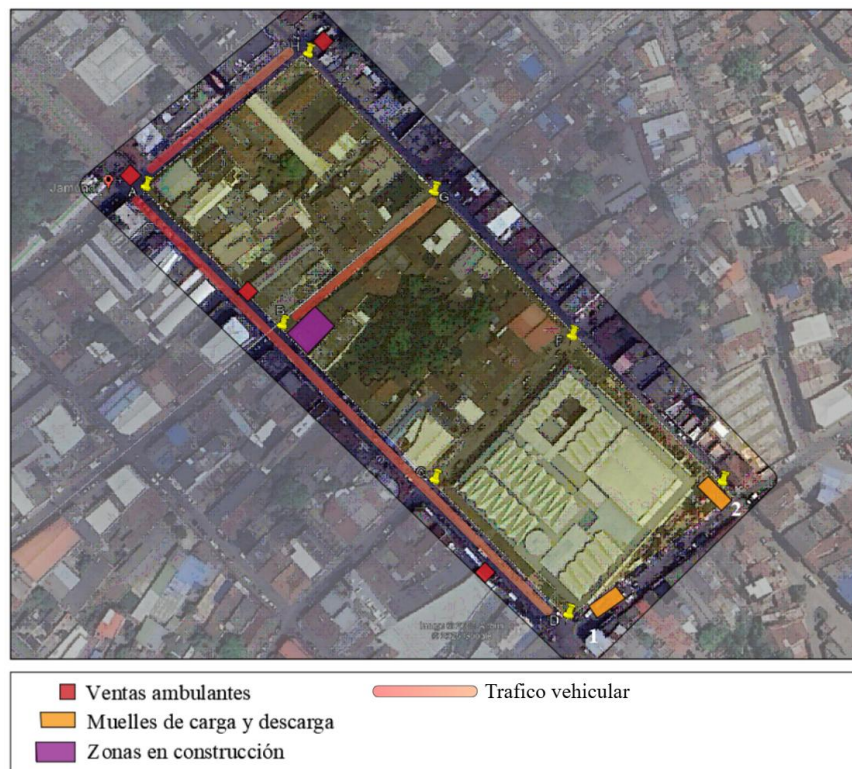


Figura 9. Identificación de fuentes emisoras

Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth (2025)

En la figura se presentan los apartados previamente descritos: los puntos de ventas ambulantes, correspondientes a negocios con asados identificados con el color rojo; la zona de construcción en cercanía al punto B identificada con el color morado; y las dos secciones de carga se muestran en color amarillo, diferenciando una sección 1 destinada al transporte de personas (buses), y la sección 2 donde se ubican los camiones de carga para alimentos y otras mercancías. Por otro lado, durante los días de muestreo se identificaron las calles con mayor flujo vehicular, lo que permitió ubicar los tramos en los que la presencia de fuentes móviles fue más notable. Estas calles corresponden a los juncos entre los puntos A-B-C-D, A-H y B-G.

Al analizar las fuentes identificadas durante el estudio, se determinó que las principales corresponden a fuentes móviles, considerando su alta frecuencia y presencia en la zona de evaluación. Como se identificó previamente, la mayoría de estas fuentes son los vehículos automotores, los cuales se desplazan constantemente por las calles y pueden representar la mayor contribución a las emisiones de material particulado. Algunos de los puntos observados, como bahías de carga, ventas ambulantes u obras civiles, pueden clasificarse como fuentes fijas o estacionarias; sin embargo, no se realizó una caracterización detallada de estas durante el estudio. La metodología priorizó la evaluación de las fuentes móviles, ya que influyen de manera más directa sobre las concentraciones de contaminantes registradas en los puntos de muestreo. No obstante, se reconoce que la presencia de fuentes fijas o estacionarias también afecta la exposición potencial y, por ello, fueron consideradas para la interpretación global de los resultados.

6.5. Determinación de jornadas de muestreo

El periodo de muestreo fue planteado con el objetivo de obtener datos representativos para las mediciones de calidad del aire. Para ello, se garantizó un número de mediciones en cada jornada. Se consolidaron los registros obtenidos en jornadas de muestreo de entre 6 y 12 horas, realizadas en horario de mañana y/o tarde. Al integrar los datos recogidos en ambos periodos, fue posible conformar muestras de 24 horas para el análisis, en este sentido, el periodo de muestreo corresponde a 6 meses desde febrero hasta julio de 2024. Bajo este concepto, se realizaron las mediciones necesarias para asegurar e integrar los datos para todos los días de muestreo.

La selección de los días y horarios de medición se dio en función de una mayor representatividad en los datos y a la dinámica comercial del sector, caracterizado por un horario de atención predominante entre semana, desde las 7:00 a.m. hasta las 7:00 p.m. en la mayoría de los establecimientos. En consecuencia, se priorizaron días hábiles, ajustando la programación a la disponibilidad operativa del dispositivo AirBeam y procurando una distribución equitativa para alcanzar días de mayor afluencia. Bajo esta consideración, se tomaron los lunes, miércoles, viernes y sábado para realizar las mediciones. Adicionalmente, se realizaron mediciones complementarias el domingo, cuando fue posible, con el fin de ampliar la cobertura temporal y capturar posibles variaciones asociadas al comportamiento del fin de semana.

6.6. Procedimiento para monitoreo y muestreo

El procedimiento realizado para el muestreo consistió en un monitoreo de 15 minutos ininterrumpidos utilizando el dispositivo *AirBeam 3* en cada punto, seguido de un desplazamiento de 5 minutos entre las ubicaciones (puntos de muestreo), dejando un tiempo promedio de 20 minutos para realizar los muestreos entre cada punto. De esta manera, se destinó un promedio aproximado de 160 minutos por ronda de muestreo (correspondientes a los 8 puntos). Además, se destinó un aproximado de 15-20 minutos para la configuración del equipo antes y durante cada ronda, alcanzando así un aproximado de 180 minutos por ronda.

Como se describió anteriormente (ver ítem 6.5), el muestreo se realizó en dos jornadas, una en la mañana de 7:00 a 13:00 y otro en la tarde de 13:00 a 19:00, cada uno con una duración estimada de 360 minutos o 6 horas. Este proceso se mantuvo durante aproximadamente 6 meses, desde febrero hasta julio de 2024. Es importante destacar que, aunque se buscó mantener la continuidad en las fechas programadas para las mediciones, diversas situaciones imprevistas en la localidad, así como la disponibilidad operativa del dispositivo AirBeam entre otros factores, dificultaron la continuidad del proceso. No obstante, se realizaron la totalidad de mediciones necesarias para concretar las 24 horas por día de muestreo. Para el análisis final, se consideraron únicamente los datos obtenidos durante el periodo estipulado de 6 meses.

6.7. Determinación de las concentraciones de PM₁₀ y PM_{2.5}.

Las concentraciones de material particulado fueron determinadas mediante el uso de un sensor portátil *AirBeam 3*, un dispositivo compacto y ligero, capaz de detectar y cuantificar partículas PM₁₀, PM_{2.5} y PM_{1.0}, además de registrar variables ambientales complementarias como la humedad relativa y la temperatura. Este equipo emplea tecnología óptica basada en la dispersión de luz para proporcionar mediciones en tiempo real con una alta resolución espacial, lo que lo hace adecuado para estudios de calidad del aire en entornos urbanos y con variabilidad espacial significativa (Habitat Map, 2021).

La medición de las concentraciones se realizó con una frecuencia semanal, tomando como días de referencia el lunes, miércoles, viernes y sábado, para un total de 4 días de muestreo por semana. Adicionalmente, se realizaron algunos muestreos los domingos como complemento para evaluar la variabilidad durante los fines de semana, no obstante, las mediciones de este día no fueron representativas dado a que no se realizaron suficientes mediciones, adoptándolo únicamente como punto de comparación. La elección de estos días respondió a la búsqueda de cubrir jornadas típicas que reflejan variaciones en el flujo vehicular y el comportamiento comercial, garantizando así una representación adecuada de las condiciones ambientales. Asimismo, esta selección estuvo condicionada por el espacio físico y el tiempo disponible para las mediciones.

La especificación de cómo se realizó el muestreo se describe con mayor exactitud en el apartado 7.3, el dispositivo empleado se puede observar en la figura 10.

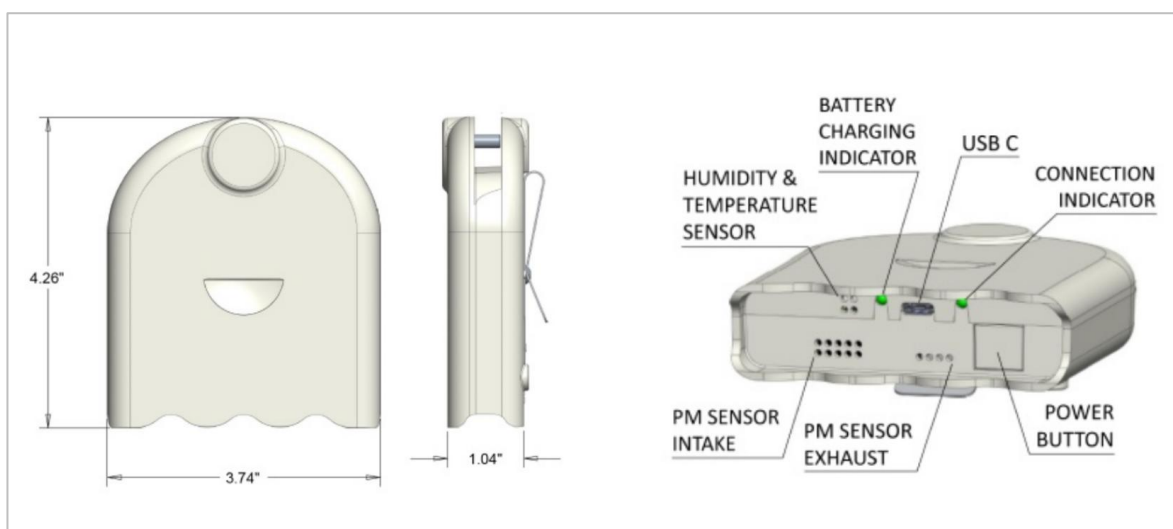


Figura 10. Dispositivo AirBeam 3

Fuente: Tomado de Habitat Map, 2021

El dispositivo cuenta con capacidad de batería diseñada para una de duración 17 horas en funcionamiento continuo, lo que permite un monitoreo controlado del PM en jornadas que se consideren representativas. Los registros se pueden observar mediante la aplicación AirCasting App, su descarga es posible mediante la página web oficial o las tiendas de aplicaciones Google Play Store y Apple Play Store, para la descarga de los registros se requiere conectar el AirBeam a un dispositivo móvil mediante Bluetooth, Wifi o el uso de una tarjeta SIM para el envío de datos.

Las especificaciones del dispositivo son las siguientes (Habitat Map, 2021):

- Peso: 6 onzas.
- Sensor de partículas: Plantower PMS7003.
- Sensor de temperatura y humedad relativa: Texas Instruments, HDC1080DMBR.
- Bluetooth, Wi-Fi y microcontrolador: Espressif, ESP32-WROOM-32D.
- Celular 4G y GPS: Quectel, LTE BG95-M3.

- Tarjeta MicroSD: OEM, 32 GB Clase 10 formateada en FAT32.
- Reloj en tiempo real: NXP EE. UU., PCF2129T/2518.
- Batería: PKCell, ICR18650 3350mAh 3.7V.

6.8. Determinación del tamaño de muestra

Similar al enfoque adoptado por Alzahrani et al. (2025) en su estudio sobre percepción ciudadana de la contaminación atmosférica en Makkah, donde se aplicó una encuesta estructurada para evaluar el conocimiento y las actitudes frente a los efectos en salud, en el presente trabajo se realizó la determinación del tamaño de muestra para el número de encuestados. (Albaraa A y otros, 2025). La determinación del tamaño de muestra puede definirse como la porción significativa de la población que cumple con las características de la investigación reduciendo los costos y el tiempo. Esta añade confiabilidad y representatividad a la encuesta, además de evita en cierta medida el sesgo en la parte activa de la investigación. Para este apartado se emplean las recomendaciones dadas por la página web en sus metodologías técnicas de proyección para encuestas (QuestionPro, 2023). El tamaño de muestra está determinado por la ecuación 1.

$$n = \frac{N * Z^2 * P * Q}{e^2 * (N - 1) + Z^2 * P * Q} \quad \text{Ecuación 1.}$$

Donde:

n = Tamaño de muestra

N = (Personas que podrían ser encuestadas)

e = Margen de error aceptado

P = Probabilidad de éxito

Q = (1-P) Probabilidad de fracaso

Z = nivel de confianza

Empleando como referencia los siguientes datos obtenidos del Censo de Población y Vivienda (CNPV) realizado por el DANE para la población de Jamundí, se tiene:

$N = 123,425$ (Correspondiente a 77.2% de la población censada equivalente a la cabecera municipal)

$e = 7 \%$

$P = 0.5$ (Proporción ideal a falta de información previa)

$Z = 1.645$ (Correspondiente a 90% de confianza)

$$n = \frac{123,425 * 1.645^2 * 0.5 * (1 - 0.5)}{0.07^2 * (123,425 - 1) + 1.645^2 * 0.5 * (1 - 0.5)}$$

Ecuación 2.

$$n = 105.61 \cong 107 \text{ encuestas}$$

6.9. Evaluación de percepción de la comunidad respecto a la calidad del aire.

La determinación de la calidad del aire se puede realizar netamente mediante investigación científica, mediciones en campo y/o empleando modelos de estimación. Sin embargo, la participación y percepción de la comunidad resulta clave cuando se trata de un proyecto de carácter social en el cual se ve intervenida y afectada, en adición el trabajo busca tener una mayor certitud en la determinación de la calidad del aire, por esta razón el componente social se integra en la totalidad del proyecto mediante un análisis sobre encuestas realizadas a los locales, cuyo foco es la perspectiva, sensación y conocimiento de la calidad del aire en la localidad. Este apartado, también permitirá obtener variables necesarias para determinar la exposición de los locales al material particulado.

La integración de metodologías validadas en estudios como el realizado por Agibayeva et al., (2024) para identificar la percepción pública sobre la calidad del aire en entornos urbanos de Asia central, demuestra que el diseño de encuestas estructurada que incluyen variables sociodemográficas (edad, educación, ocupación, estado de salud), percepción de fuentes de contaminación, conocimiento sobre impactos en la salud y disposición a actuar, contextualiza y da mayor alcance a las intervenciones y estudios sobre la calidad del aire, identificando grupos vulnerables y correlacionando la exposición real con mediciones ambientales, optimizando así la evaluación de riesgos y el diseño de políticas públicas basadas en evidencia socioambiental. Bajo este enfoque, la encuesta debe cumplir con las siguientes consideraciones:

- El grado de conocimiento sobre fuentes de contaminación atmosférica.
- La percepción del impacto en la salud respiratoria y cardiovascular.
- La preocupación frente a la calidad del aire en el entorno cotidiano.
- Las actitudes hacia políticas públicas y medidas de mitigación.

Siguiendo esta línea, el presente estudio incorpora una encuesta estructurada cuyo objetivo es captar la perspectiva, sensación y conocimiento de los habitantes de Jamundí respecto a la calidad del aire. Este apartado también permitirá obtener variables necesarias para estimar la exposición diferencial al material particulado ($PM_{2.5}$ y PM_{10}), considerando factores sociodemográficos y patrones de movilidad.

- Los encuestados no deben requerir de conocimientos previos sobre calidad del aire o contaminación atmosférica.
- Los encuestados deben ser habitantes o visitantes frecuentes de la zona central municipio de Jamundí.
- La encuesta no debe tomar más de 10 minutos, además se debe contar con un espacio de aclaración e instrucción respecto a la investigación y preguntas dentro del tiempo establecido.
- La encuesta no debe requerir información personal por parte del encuestado a diferencia del mínimo de edad permitido (15 años).

La encuesta fue diseñada considerando casos de estudio similares donde se presentan metodologías para evaluar la percepción comunitaria como componente social en investigaciones sobre la contaminación del aire por PM, como es el caso del trabajo de (Porrás Castro, 2023) quien analizo la exposición a PM en bici usuarios del sur de Cali, incorporando igualmente este

componente social mediante encuestas en su investigación. Este modelo está compuesto por dos secciones, diseñados para evaluar el conocimiento general de los participantes sobre la calidad del aire. El primer componente es una caracterización sociodemográfica de los encuestados, identificando edad, género, estrato socioeconómico, nivel de estudios y ocupación. El segundo componente consiste en el formulario de percepción, mediante el cual se analiza la opinión de los participantes mediante opciones de selección múltiple. El modelo de encuesta se encuentra en el anexo 1.

Para la aplicación de las encuestas, se seleccionó a transeúntes en la zona, los cuales podrían ser locales o visitantes de la localidad, estableciendo como único criterio para realizar la encuesta una edad mínima de 15 años, buscando que los encuestados tuvieran la capacidad cognitiva y experiencia para responder la encuesta. Antes de realizar la encuesta, se ofreció a los empleados una breve contextualización sobre el estudio realizado, durante el proceso se aclararon dudas resultantes relacionadas con el tema, garantizando además una mayor comprensión de las preguntas formuladas y de la temática en general.

6.10. Estimación de la exposición al material particulado.

Para la determinación de la exposición y dosis diaria se emplea el modelo planteado en el manual de factores de exposición o EFH por sus siglas en inglés '*Exposure Factors Handbook*'. (EPA, 2011). La exposición es dada por la ecuación 2 que relaciona la concentración del contaminante con el tiempo de contacto.

$$E = \int_{t_1}^{t_2} C(t)dt \quad \text{Ecuación 3.}$$

Donde:

E = Exposición (tiempo*masa/volumen)

t_2-t_1 = Duración de la exposición (tiempo)

C = Concentración (masa/volumen)

Para la determinación de la dosis diaria promedio o ADD por sus siglas en inglés (*Average Daily Dose*) la cual promedia la exposición en un periodo de tiempo se emplea la ecuación 4.

$$ADD = \frac{\text{Dosis de ingesta}}{\text{Peso corporal} * \text{Tiempo promedio}} \quad \text{Ecuación 4.}$$

Para la determinación de la dosis de ingesta se emplea la ecuación 5.

$$\text{Dosis de ingesta} = C * TI * TE \quad \text{Ecuación 5.}$$

Donde:

C = Concentración (masa/volumen)

TI = Tasa de ingesta (masa/tiempo)

TE = Tiempo de exposición (tiempo)

En el Manual de Factores de Exposición de la EPA (2011) se establece que, para exposición por inhalación, la tasa de ingesta corresponde a la cantidad de aire contaminado inhalado por una persona en un periodo determinado, convirtiéndose en tasa de inhalación. Esta fuente fue empleada para la determinación de las variables correspondientes a tasa de ingesta y tiempo de exposición.

El capítulo 6 del manual presenta las tasas de inhalación (TI). Esta información se utiliza para contrastar con los resultados obtenidos mediante las encuestas, determinando así un grupo de edad para la selección del valor de exposición, requerido para la determinación del valor de exposición. En la tabla 5 se encuentran las tasas de inhalación para periodos cortos en función de la edad y una actividad física moderada.

Tabla 5. Valores recomendados a exposición por inhalación patrones de actividad – Periodos cortos

Nivel de actividad	Grupo de edad (años)	Promedio (m ³ /min)	Percentil 95° (m ³ /min)
Intensidad Moderada	recién nacido a <1	1.40E-02	2.20E-02
	1 a <2	2.10E-02	2.90E-02
	2 a <3	2.10E-02	2.90E-02
	3 a <6	2.10E-02	2.70E-02
	6 a <11	2.20E-02	2.90E-02
	11 a <16	2.50E-02	3.40E-02
	16 a <21	2.60E-02	3.70E-02
	21 a <31	2.60E-02	3.80E-02
	31 a <41	2.70E-02	3.70E-02
	41 a <51	2.80E-02	3.90E-02
	51 a <61	2.90E-02	4.00E-02
	61 a <71	2.60E-02	3.40E-02
	71 a <81	2.50E-02	3.20E-02
	≥ 81	2.50E-02	3.10E-02

Fuente: Traducido y adaptado de Capítulo 6. Manual de Factores de Exposición (EPA, 2011)

Por su parte, el capítulo 16 del manual proporciona los valores promedio para los tiempos de exposición (TE). Apartado requerido para la determinación del tiempo promedio de estadía para los visitantes a la localidad bajo la consideración de las características propias del sector. Estos datos se emplean como referencia para correlacionar el valor de exposición correspondiente a la edad registrada mediante las encuestas, permitiendo así identificar tiempo promedio de actividad para el segmento de edad correspondiente, dato que se utiliza para la determinación de la exposición de los individuos.

En la tabla 6 se encuentra el tiempo promedio de exposición en las afueras en función de la edad.

Tabla 6. Valores recomendados para patrones de actividad – Tiempo en las afueras

Grupo de edad	Promedio (mins/día)	Fuente
Recién nacidos < 1 mes	0	Análisis de la EPA de EE. UU. de los datos fuente de Wiley et al. (1991) para grupos de edad desde el nacimiento hasta <12 meses. Media de niños, población total.
1 a <3 meses	8	
3 a <6 meses	26	
6 a <12 meses	139	
1 a <2 años	36	Reanálisis de la EPA de EE. UU. de los datos fuente de la EPA de EE. UU. (1996) para grupos de edad de 1 a <21 años, población total.
2 a <3 años	76	
3 a <6 años	107	
6 a <11 años	132	
11 a <16 años	100	Adultos, ≥ 18 años (U.S. EPA, 1996). Total, de minutos pasados al aire libre fuera de la residencia y los minutos pasados al aire libre en la residencia.
16 a <21 años	102	
21 a <65 años	281	
≥ 65 años	298	

Fuente: Traducido y adaptado de Capítulo 16. Manual de Factores de Exposición (EPA, 2011)

6.11. Análisis de la información

Para el análisis de información y la discusión de resultados se distinguieron dos apartados, los datos de calidad del aire y los obtenidos en las encuestas, para los primeros, tras una depuración realizada a los registros del dispositivo *AirBeam 3*, se procesaron los datos generando gráficos, diagramas e ilustraciones con software especializado. Para la gestión y análisis de los registros, se emplearon las herramientas de Microsoft Office; Microsoft Word para la edición y documentación de la información textual y Microsoft Excel para la realización de cálculos estadísticos y el manejo de los registros del material particulado, incluyendo la determinación de la exposición y la elaboración de gráficos básicos.

Para un análisis estadístico avanzado y visualizaciones específicas del comportamiento de los contaminantes, se recurrió al software RStudio, que ofrece una amplia gama de funciones y paquetes diseñados para el manejo de datos ambientales. En particular, se emplearon librerías como ‘ggplot2()’ para la construcción de diagramas de caja y otros gráficos estadísticos, y ‘openair()’, orientada al análisis de la calidad del aire y la contaminación atmosférica, facilitando una interpretación robusta y especializada de los datos ambientales obtenidos.

El uso de librerías relacionadas con el paquete *OpenAir* fue posible gracias a la guía metodológica presentada por Carslaw en el año 2019, la cual identifica procedimientos específicos para el tratamiento de datos de calidad del aire, incluyendo series temporales, análisis de concentración de contaminantes y visualización de patrones de dispersión. Esta guía presenta lineamientos y recomendaciones claras para la estructuración de los datos, la depuración de registros inválidos y la generación de gráficos interpretativos como rosas de contaminantes, calendar plots, entre otros; esenciales para el análisis espacial y temporal del material particulado (Carslaw, 2019).

Por su parte, para el registro de la percepción y encuestas fue empleado el servicio de formularios de Google Forms y Microsoft Forms, en conjunto con registros en papel para la revisión en campo. Todos los resultados obtenidos fueron contrastados con bibliografía en línea destacando los registros de calidad del aire, los informes realizados en Jamundí o localidades vecinas y la información proporcionada por webs con monitoreo de contaminación atmosférica bajo asesoramiento profesional.

Para el procesamiento de los resultados obtenidos con las encuestas, se depuraron y recopilaron los datos, posteriormente fueron editados y organizados en Microsoft Excel para la elaboración de gráficos que facilitan su análisis e identificación.

6.12. Selección y depuración de datos

Para la selección y depuración de los datos, como se indica en el apartado previo (ver ítem 6.11). Se emplean las funciones '*quantile()*' y '*subset()*' en el software de RStudio. Este procedimiento permite filtrar y segmentar los datos de PM₁₀ y PM_{2.5}, identificando y excluyendo registros atípicos que pueden comprometer la integridad del análisis. Como resultado se obtienen listas depuradas con datos más representativos.

Objetivamente, se eliminaron aquellos datos no registrados o identificados como N/A (Forma abreviada del *Not Available* por sus siglas en inglés) y aquellos valores atípicos en base al método de rango intercuartílico (IQR), este consiste en calcular el primer cuartil el cual representa el valor por debajo del 25% inferior de los datos, y el tercer cuartil, que delimita el 75% superior, siendo la diferencia entre estos el determinado IQR. Para este proceso se establecen umbrales, considerando cualquier dato fuera del rango $Q1 - 1,5IQR$ a $Q3 + 1,5IQR$ (Gonzales y otros, 2024).

El procedimiento realizado en *RStudio* corresponde al modelo empleado para *Python* según Gonzales y otros (2024), este modelo se resume en los pasos que se presentan a continuación:

1. Se calcularon los valores de Q1 y Q3 para las distribuciones de concentraciones de PM₁₀ y PM_{2.5}.
2. Se calculó el IQR para cada conjunto de datos.
3. Se identificaron los valores atípicos utilizando los criterios mencionados anteriormente.
4. Se limitaron los valores atípicos del conjunto de datos.

Como medida de corroboración, se elaboraron listados con la totalidad de los datos registrados para la jornada completa, integrando entonces ambas jornadas (mañana y tarde). Este proceso es realizado de manera correspondiente para cada día. A partir de estos nuevos datos consolidados, se obtienen diagramas de caja para días completos los cuales muestran una distribución de resultados que se emplea como contraparte comparativa a los resultados obtenidos por jornada.

7. Resultados y discusión

7.1. Análisis de mediciones y determinación de concentraciones para PM₁₀ y PM_{2.5}

Los resultados obtenidos para PM₁₀ Y PM_{2.5} por días se derivan del procesamiento de los datos recolectados para el total de los ocho puntos de muestreo durante los días correspondientes (lunes, miércoles, viernes, sábado) adicionalmente, se maneja el domingo como complemento a las mediciones adicionales realizadas, los resultados y determinaciones correspondientes a este

día se trabajan en sus ítems correspondientes. Tras la depuración de los datos, los resultados se presentan mediante el uso de diagramas de caja lo que facilita la interpretación de los resultados.

En este sentido, los resultados se organizan en dos apartados que, aunque se basan en la misma base de datos, buscan ofrecer una mejor comparación y comprensión. Se presentan resultados agrupados para todos los días de medición, mostrando comparaciones semanales para jornadas y días compuestos, permitiendo así una visión general consolidada para el lector. Posteriormente, se realiza un análisis más detallado por día, permitiendo identificar variaciones y patrones específicos que pueden enriquecer la interpretación de los datos. Los límites de referencia corresponden a los indicados por las directrices mundiales de la OMS (2022), para la calidad del aire para exposiciones de 24 horas y la resolución 2254 de 2017 bajo la definición aplicada desde el 1 de julio de 2018 para tiempos de exposición de 24 horas (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).

7.1.1. Comparación semanal para jornadas

Previo a la determinación y comparación de los resultados obtenidos para cada día, se realizaron diagramas comparativos para los días de la semana de muestreo para PM_{10} y $PM_{2.5}$. Esta estrategia se adoptó al no observarse una fuerte correlación entre los resultados obtenidos por jornadas y aquellos correspondientes a los días compuestos, en este sentido, se decidió presentar diagramas de caja comparativos para ambos casos, con el objetivo de visualizar y contrastar de manera más clara las distribuciones y posibles diferencias entre las distintas formas de agrupación de los datos. Cabe destacar que el análisis detallado y específico para cada día de muestreo se desarrolla más adelante, profundizando así en la interpretación de las variaciones y patrones observados de manera preliminar.

A continuación, se presentan los diagramas correspondientes a PM_{10} para las jornadas de la mañana (Gráfico 1) y tarde (Gráfico 2):

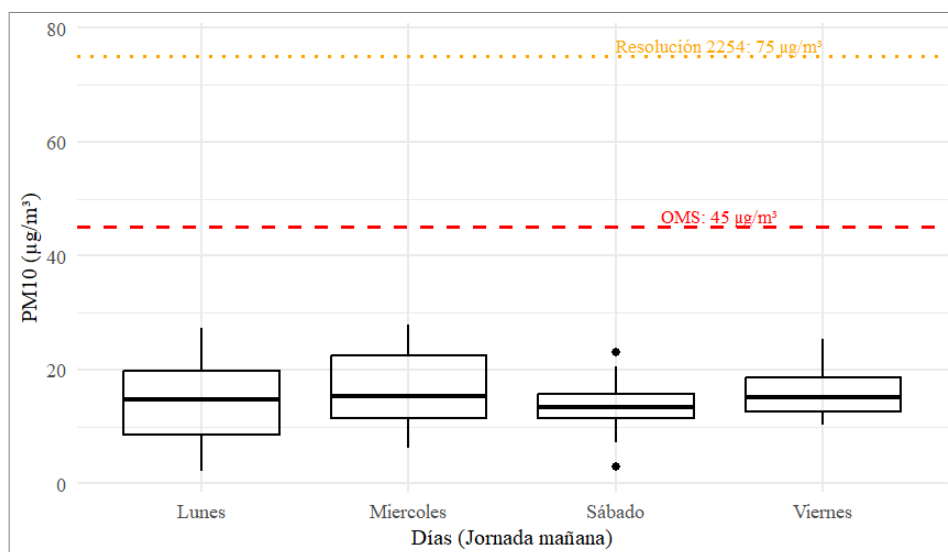


Gráfico 1. Comparación semana PM_{10} jornada mañana (07:00 – 13:00)

Fuente: Elaboración propia.

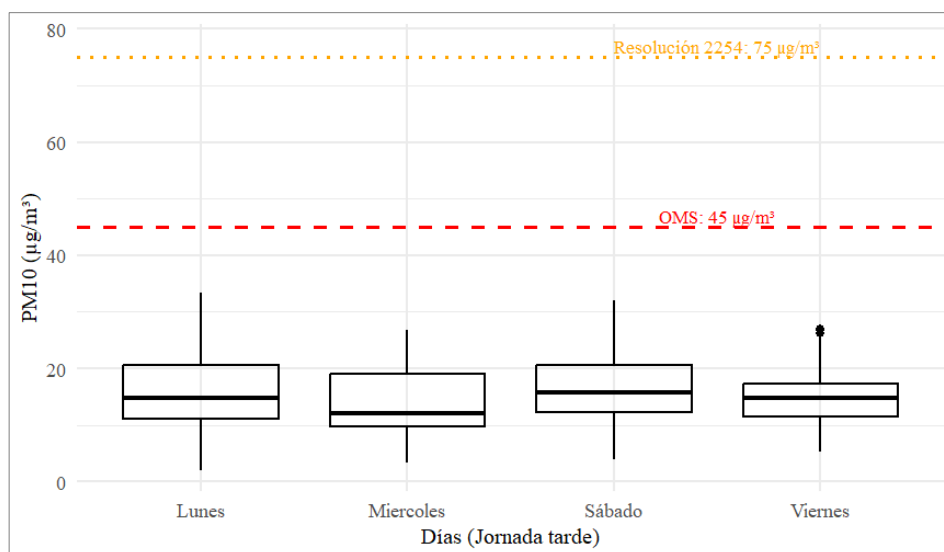


Gráfico 2. Comparación semana PM₁₀ jornada tarde (13:00 – 19:00)

Fuente: Elaboración propia.

Al analizar la distribución de datos entre las jornadas, se observa que ambos presentan comportamientos similares, no hay diferencias significativas entre las concentraciones medidas en la mañana respecto a la tarde, ambas jornadas cumpliendo los límites recomendados por la OMS (2022) y la resolución 2254 de 2017. Por otra parte, al tomar como referencia el valor promedio observable en los diagramas de caja, el miércoles destaca por tener los niveles más altos para el PM₁₀ en la mañana ($16.98 \mu\text{g}/\text{m}^3$ frente a $14.98 \mu\text{g}/\text{m}^3$), mientras que, para la jornada de tarde, el lunes y sábado son similares, manteniéndose con los niveles más elevados para el contaminante (ambos con una concentración promedio de $16.36 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Adicionalmente, como reflejo de los valores extremo se evidencia que los niveles alcanzan valores más elevados en la tarde.

A continuación, se presentan los diagramas correspondientes a PM_{2.5} para las jornadas de la mañana (Gráfico 3) y tarde (Gráfico 4):

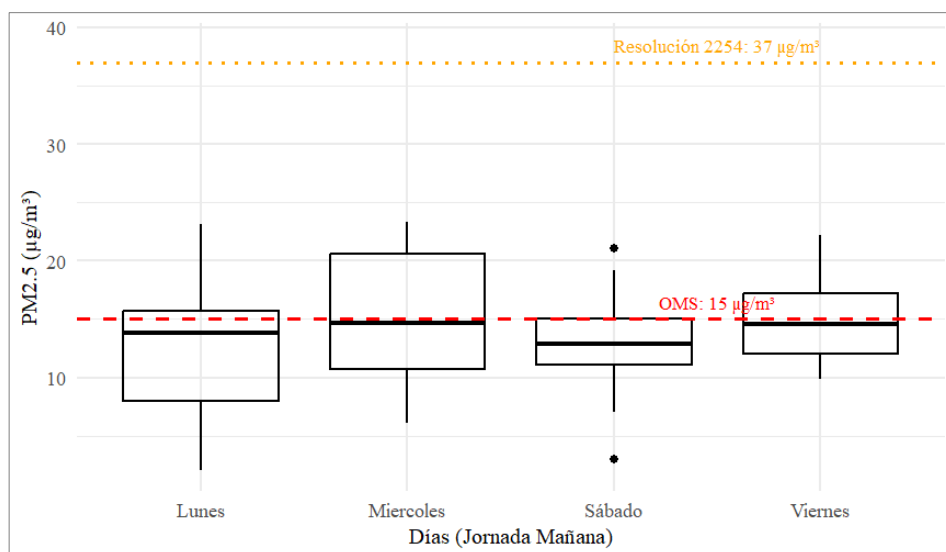


Gráfico 3. Comparación semana $PM_{2.5}$ jornada mañana (07:00 – 13:00)

Fuente: Elaboración propia.

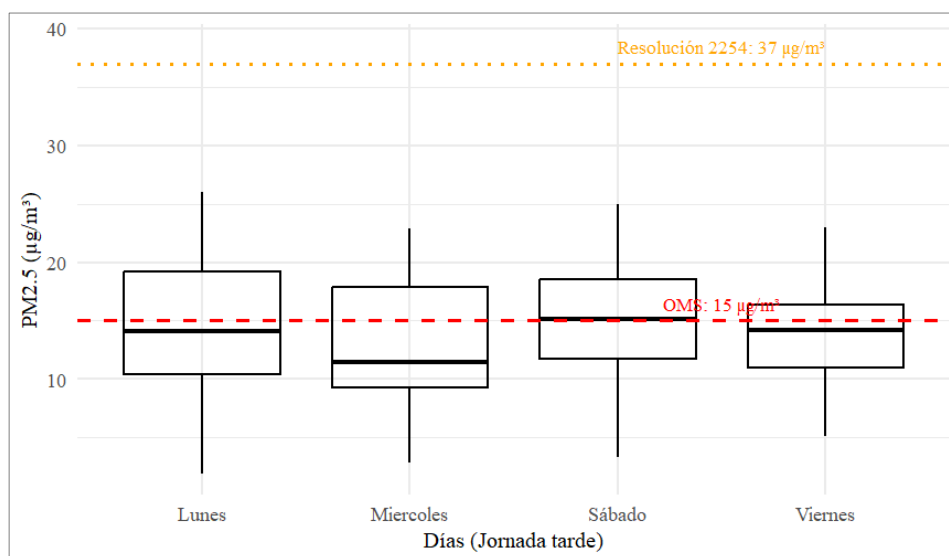


Gráfico 4. Comparación semana $PM_{2.5}$ jornada tarde (13:00 – 19:00)

Fuente: Elaboración propia.

Al analizar la distribución de datos entre las jornadas, se observa que, de manera opuesta al comportamiento evidenciado con el PM_{10} , los diagramas para el $PM_{2.5}$ muestran diferencias ligeramente más notorias, no obstante, no llegan a ser significativas entre las jornadas. Destaca particularmente el sábado por superar el límite recomendado por la OMS (2022). Sin embargo, es importante considerar que este valor de referencia corresponde a un límite establecido para jornadas de 24 horas y este valor corresponde a una composición de 6 horas (jornada tarde).

Bajo esta consideración, el sábado presenta el promedio más alto para el $PM_{2.5}$ durante la jornada de la tarde, seguida del lunes. Curiosamente, el sábado también presenta el promedio más bajo

durante la jornada de la mañana, con el lunes nuevamente en segundo lugar, lo que refleja una variación diaria especialmente marcada en comparación con el resto de los días analizados. Adicionalmente, como reflejo de los valores extremos, se evidencian niveles más altos en la concentración del $PM_{2.5}$ en la tarde destacando la incidencia de los episodios con de mayor contaminación para estos días.

7.1.2. Comparación semanal para día compuesto

A continuación, se presentan los diagramas correspondientes a los días compuestos para PM_{10} (Grafico 5) y $PM_{2.5}$ (Grafico 6):

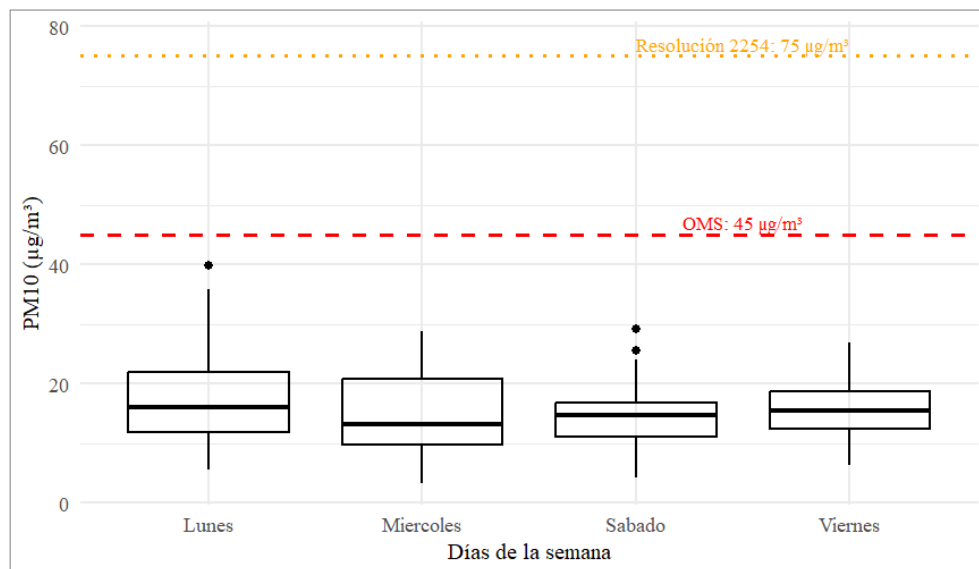


Gráfico 5. Comparación semana PM_{10} día compuesto

Fuente: Elaboración propia.

Para el PM_{10} , se observa una distribución general y similar a la presentada en las jornadas; no obstante, los resultados muestran diferencias puntuales. Se evidencia que el lunes cuenta con el valor promedio más alto, como también el valor extremo más elevado en comparación a los otros días de muestreo. Adicionalmente, se evidencia una menor variación en los promedios diarios, contrastando con lo evidenciado con los resultados obtenidos por jornadas.

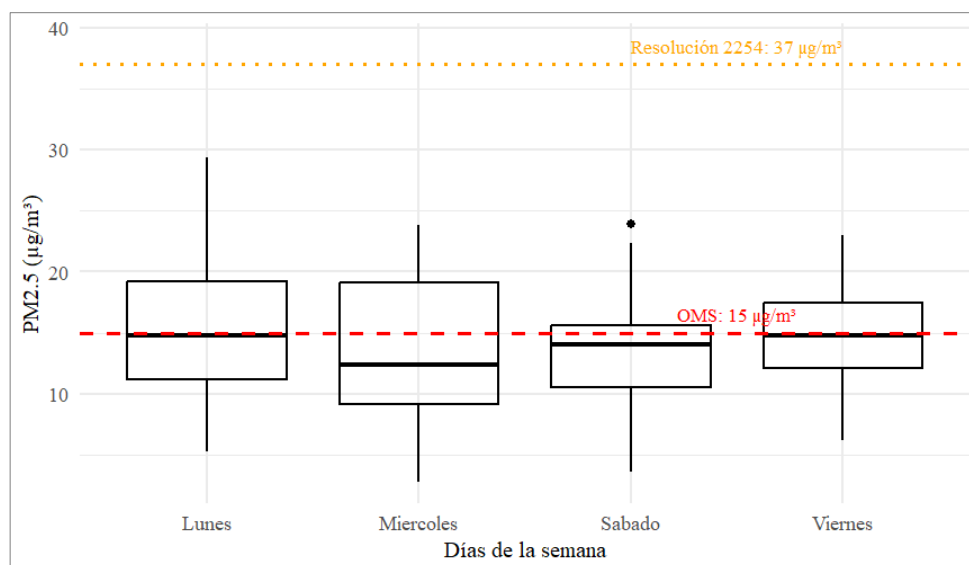


Gráfico 6. Comparación semana PM_{2.5} día compuesto

Fuente: Elaboración propia.

Para el PM_{2.5}, se observa una distribución similar a la presentada por el PM₁₀ con cumplimiento total para la resolución 2254 de 2017. No obstante, lunes y viernes se mantienen sobre el límite lo recomendado por la OMS (2022), alcanzando el lunes picos más notorios frente a los otros días.

Pese a esto, considerando la jornada de 12 horas correspondiente al día compuesto, es importante destacar que las concentraciones registran picos en horas específicas, destacando el lunes por presentar los valores más elevados. No obstante, el promedio calculado puede atenuar o diluir el impacto de los picos, los cuales ya pasaron por un filtrado en el proceso de depuración de datos, generando así un valor que, en teoría, puede compararse con los días “compuestos” para cada PM. Adicionalmente, es importante resaltar que estos datos son indicativos, debido a que no cuentan con la representatividad temporal necesaria para ser comparados directamente con la norma, la cual establece un criterio de muestreo de 24 horas. Esta consideración es comprensible dado el alcance del trabajo de grado y la metodología desarrollada para alcanzar estos resultados.

7.2. Análisis de mediciones de PM y determinación de concentraciones por días en jornadas de mañana y tarde

Aunque los datos utilizados en ambas determinaciones son los mismos, el análisis por días permite una mayor profundidad y precisión en la interpretación del comportamiento de los días críticos. Al confrontar estos resultados con el análisis basado en días compuestos, no se identificó una relación directa entre los resultados por jornadas, se evidencia que el proceso de depuración de datos, el cual incluye la eliminación de valores extremos y la integración de datos por jornadas, genera patrones diferentes.

Esto puede deberse a que ciertos valores, que, aunque no califiquen como extremos, influyen significativamente en el promedio general de los días compuestos, lo que da lugar a diferencias notorias al compararse con los resultados obtenidos por jornadas.

7.2.1. *Lunes*

Para el lunes en se presenta la distribución correspondiente al PM_{10} en el Grafico 7 y para $PM_{2.5}$ en el Grafico 8.

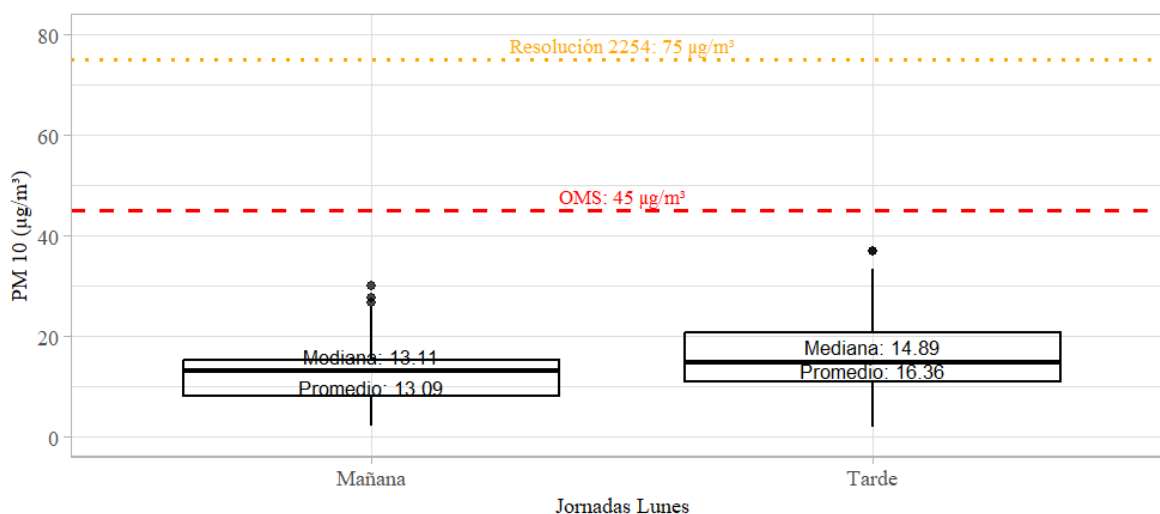


Gráfico 7. PM_{10} jornada lunes

Fuente: Elaboración propia.

Para el PM_{10} en la jornada de la mañana, se encuentra un promedio de $13.09 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con una mediana de $13.11 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ambos valores por debajo de los límites establecidos por la OMS (2022) y la resolución 2254 de 2017. Es de aclarar que la inclusión de ambos valores responde a la búsqueda de una representación más adecuada de los resultados, dado que el promedio ofrece una estimación del valor esperado considerando todos los datos, mientras que la mediana por su parte ofrece una visión más robusta ante la presencia de valores atípicos.

Aunque se encuentran algunos valores sobre los $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ se mantiene en el rango de categoría “Buena”, según el ICA. Para la jornada de la tarde se encuentra un promedio de $14.89 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con una mediana de $16.36 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ambos valores por debajo de los límites establecidos por la OMS (2022) y la resolución 2254 de 2017, estos dentro de la categoría “Bueno” según el ICA.

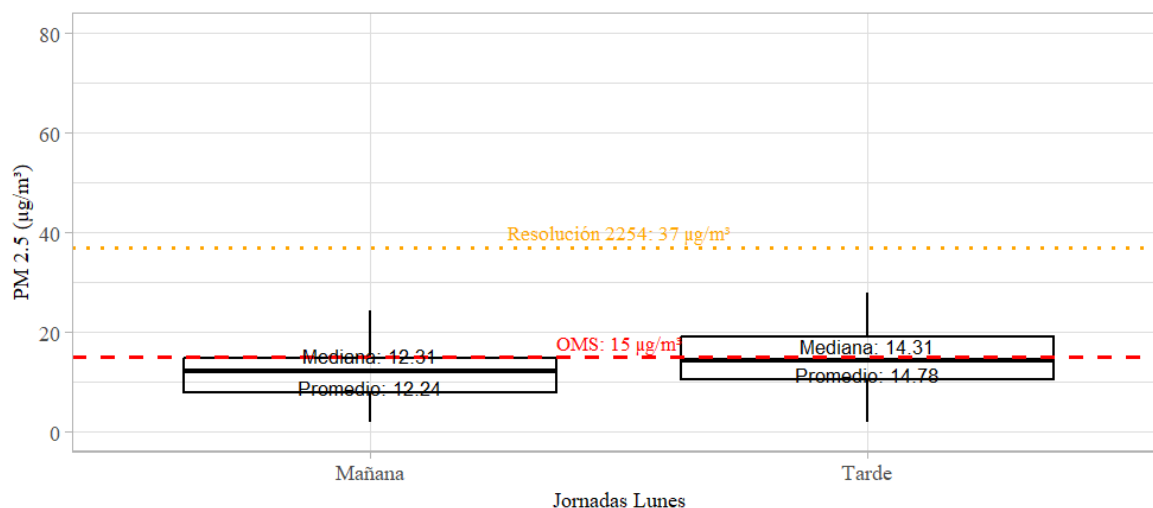


Gráfico 8. PM_{2.5} jornada lunes

Fuente: Elaboración propia.

El PM_{2.5} cuenta en la mañana con un promedio de 12.24 µg/m³ con una mediana de 12.31 µg/m³, ambos valores por debajo de los límites establecidos por la OMS (2022) y la resolución 2254 de 2017 como es el caso del PM₁₀, estos valores también se encuentran dentro de la categoría “Aceptable” según el ICA. No obstante, se encuentran valores límites que superan lo establecido por la OMS. En la tarde se encuentra un promedio de 14.78 µg/m³ y una mediana de 14.31 µg/m³, ambos valores sobre el límite establecido de 15 µg/m³ por la OMS (2022), pero manteniéndose sobre el rango adecuado de la resolución 2254 de 2017. Estos resultados corresponden a la clasificación “Aceptable” para el contaminante.

Al comparar los resultados entre las jornadas, se determina que para el lunes en la jornada de la tarde se registraron los niveles más altos de material particulado (PM₁₀ y PM_{2.5}). No obstante, manteniéndose en los límites establecidos por la OMS (2022) y la resolución 2254 de 2017, manteniendo un nivel que según el ICA puede clasificarse de manera general como “Aceptable”.

7.2.2. *Miércoles*

Para el miércoles en la mañana se presenta la distribución correspondiente al PM₁₀ en el Gráfico 9 y para PM_{2.5} en el Gráfico 10.

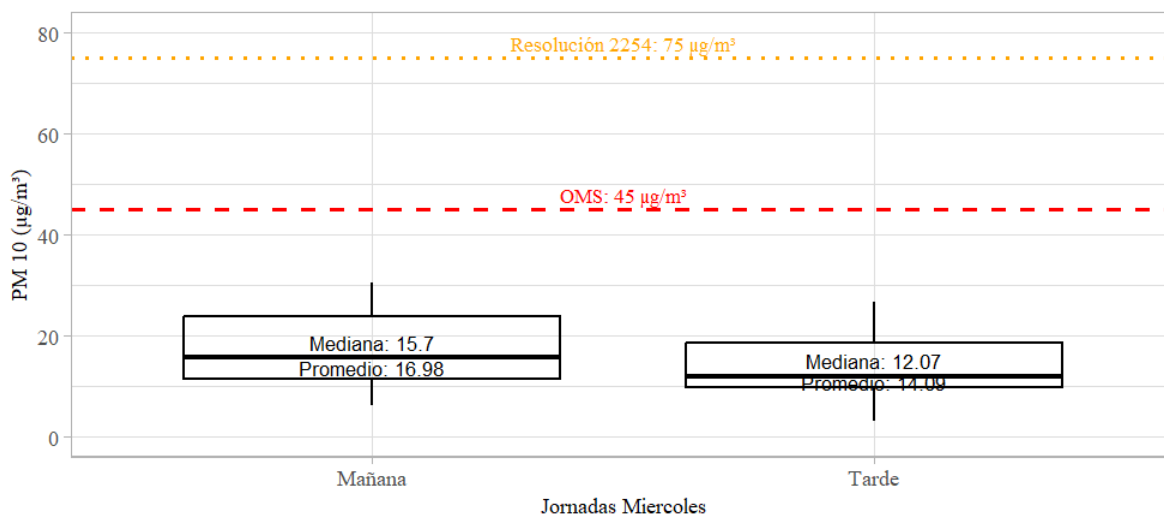


Gráfico 9. PM_{10} jornada miércoles

Fuente: Elaboración propia.

Para el PM_{10} en la mañana se encuentra un promedio de $16.98 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y la mediana con $15.70 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ambos valores por debajo de los límites establecidos por la OMS (2022) y la resolución 2254 de 2017, estos dentro de la categoría “Bueno” según el ICA. Para la tarde se encuentra un promedio de $14.09 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y la mediana con $12.07 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ambos valores por debajo de los límites establecidos por la OMS (2022) y la resolución 2254 de 2017, estos dentro de la categoría “Bueno” según el ICA.

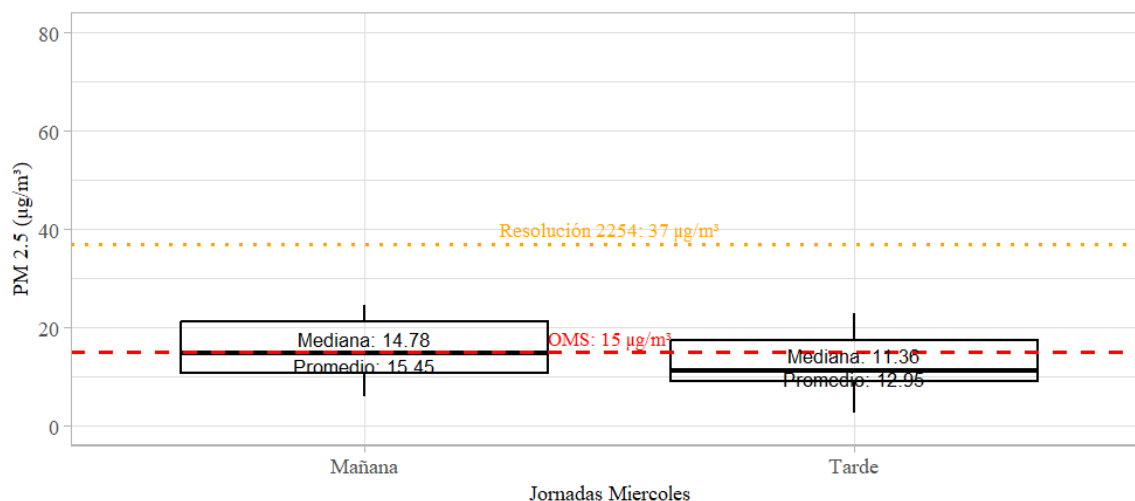


Gráfico 10. $PM_{2.5}$ jornada miércoles

Fuente: Elaboración propia.

Para el $PM_{2.5}$ se encuentra un promedio de $15.45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con una mediana de $14.78 \mu\text{g}/\text{m}^3$, aunque la mediana se encuentra sobre un límite inferior, estos valores se obtienen excluyendo los datos atípicos, los cuales ya han sido excluidos con procesos anteriores. Por esta razón el valor de referencia es el promedio el cual excede los límites de la OMS. Estos valores se encuentran dentro de los límites establecidos por la resolución 2254 de 2017 y se mantienen sobre la categoría “Aceptable” del ICA. Por la jornada de la tarde, se encuentra un promedio de $12.95 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con una mediana de $11.36 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ambos valores inferiores a los límites establecidos por la OMS (2022) y la resolución 2254 de 2017 bajo la categoría de “Aceptable” según el ICA.

Al analizar los resultados entre las jornadas para el miércoles, destaca la jornada de la mañana por registrar los promedios más altos para PM_{10} y $PM_{2.5}$ en la totalidad de los días de muestreo en dicha jornada, con el $PM_{2.5}$ superando el valor recomendado por la OMS (2022). De manera general, para este día se registra una calidad de aire “Aceptable” según la clasificación del ICA y bajo los límites establecidos por la resolución 2254 de 2017 para ambos contaminantes.

7.2.3. *Viernes*

Para el viernes en la mañana se presenta la distribución correspondiente al PM_{10} en el Gráfico 11 y para $PM_{2.5}$ en el Gráfico 12.

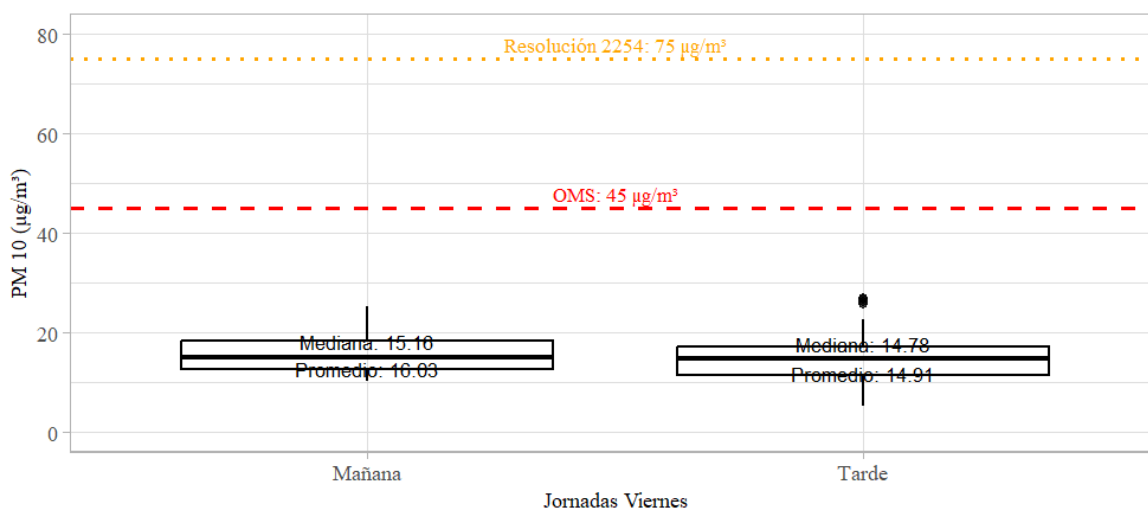


Gráfico 11. PM_{10} jornada viernes

Fuente: Elaboración propia.

Para el PM_{10} en la mañana se encuentra un promedio de $16.03 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y la mediana con $15.016 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ambos valores por debajo de los límites establecidos por la OMS (2022) y la resolución 2254 de 2017, estos dentro de la clasificación “Bueno” según el ICA. En la jornada de la tarde se encuentra un promedio de $14.91 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y la mediana con $14.70 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ambos valores por debajo de los límites establecidos por la OMS (2022) y la resolución 2254 de 2017 para este contaminante, corresponden a una clasificación “Bueno” según el ICA.

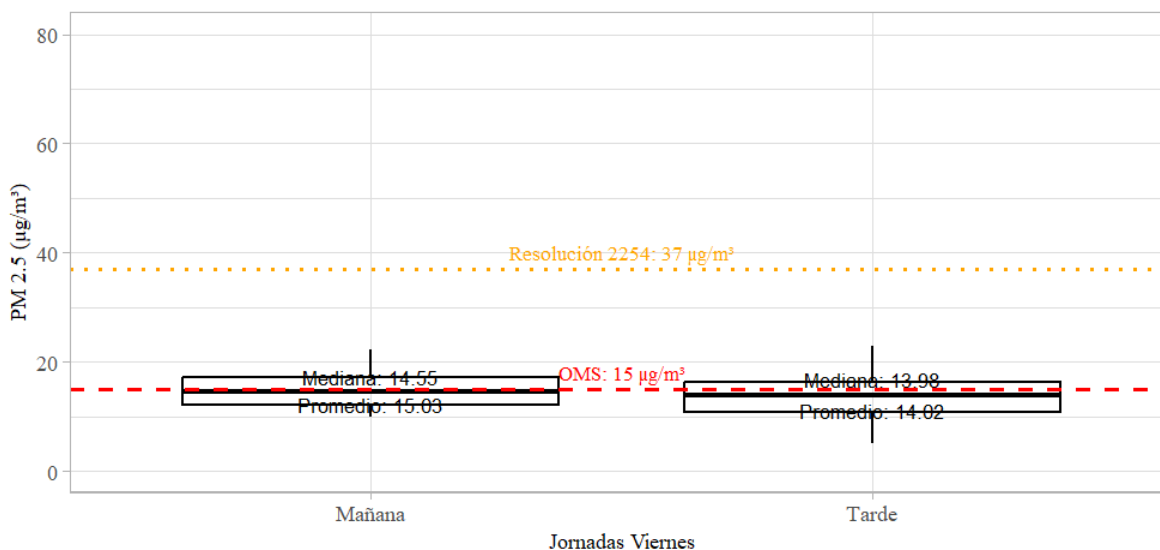


Gráfico 12. $PM_{2.5}$ jornada viernes

Fuente: Elaboración propia.

Para el $PM_{2.5}$, en la mañana se observa un caso similar al comportamiento registrado el miércoles por la mañana, con un promedio de $15.03 \mu\text{g}/\text{m}^3$ excediendo los límites establecidos por la OMS (2022) y una mediana de $14.55 \mu\text{g}/\text{m}^3$ que se acerca a dicho límite. No obstante, ambos valores dentro de lo establecido por la resolución 2254 de 2017, categorizándose con una calidad de aire “Aceptable” según el ICA. En la tarde registra un promedio de $14.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y una mediana de $13.98 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ambos valores por debajo de los límites establecidos por la OMS (2022) y la resolución 2254 de 2017, dichos resultados corresponden la clasificación “Aceptable” del ICA para este contaminante.

Al comparar las jornadas del viernes, se evidencia que durante la mañana se registraron niveles más altos para PM_{10} y $PM_{2.5}$, siendo este último contaminante el que supera los niveles establecidos por la OMS (2022) para esa jornada. No obstante, los resultados se encuentran dentro de los límites establecidos por la resolución 2254 de 2017 y corresponden a una clasificación “Aceptable” según el ICA.

7.2.4. **Sábado**

Para el sábado en la mañana se presenta la distribución correspondiente al PM_{10} en el Gráfico 13 y para $PM_{2.5}$ en el Gráfico 14.

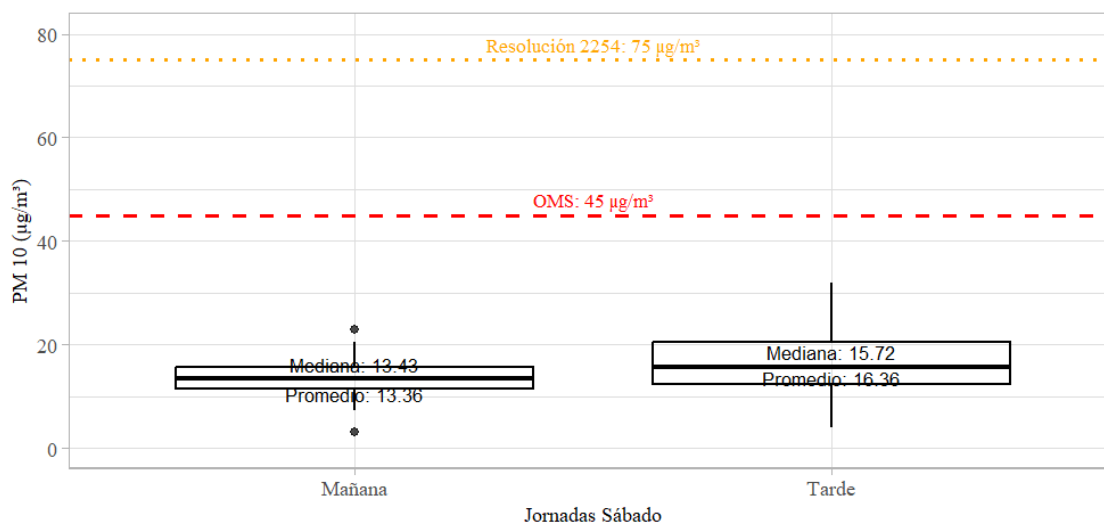


Gráfico 13. PM_{10} sábado

Fuente: Elaboración propia.

El PM_{10} en la mañana, presenta un promedio de 13.36 $\mu g/m^3$ y la mediana con 13.43 $\mu g/m^3$, ambos valores por debajo de los límites establecidos por la OMS (2022) y la resolución 2254 de 2017 para este contaminante, corresponden a una clasificación “Bueno” según el ICA. Para esta jornada se observa una baja variabilidad, reflejándose en un diagrama de cajas compacto y con rangos intercuartílicos ligeramente reducidos al compararse con anteriores resultados. Para la tarde cuenta con un promedio de 16.36 $\mu g/m^3$ y la mediana con 15.72 $\mu g/m^3$, ambos valores por debajo de los límites establecidos por la OMS (2022) y la resolución 2254 de 2017. Corresponde a una clasificación “Bueno” según el ICA.

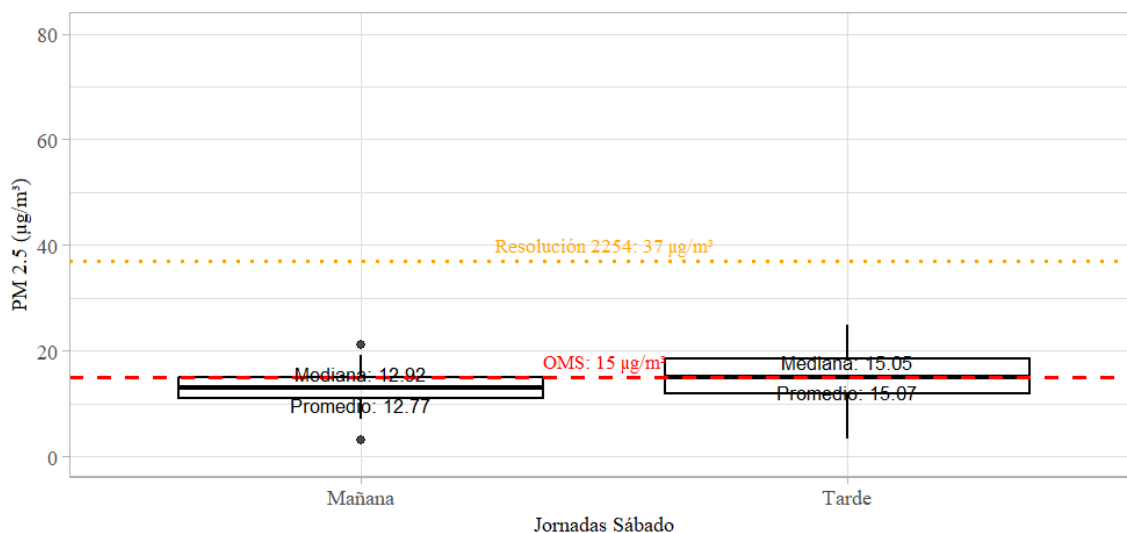


Gráfico 14. $PM_{2.5}$ sábado

Fuente: Elaboración propia.

El PM_{2.5} registra en la mañana un promedio de 12.77 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y una mediana de 12.92 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, ambos valores por debajo de los límites establecidos por la OMS (2022) y la resolución 2254 de 2017, dichos resultados corresponden a la clasificación “Aceptable” del ICA para este contaminante. Adicionalmente, se evidencia una baja variabilidad en los datos, aunque destacan los valores atípicos (puntos negros) con más notoriedad al compararse con otros días y jornadas. En la tarde presenta un promedio de 15.07 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y una mediana de 15.05 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, ambos valores superiores a los límites establecidos por la OMS (2022), no obstante, se encuentran bajo los límites de la resolución 2254 de 2017. Estos resultados corresponden a una clasificación “Aceptable” según el ICA.

Al comparar las jornadas del sábado, se evidencia que, para la jornada de la tarde a diferencia de los días previos (lunes, miércoles y viernes) se presentan los niveles más altos para PM_{2.5} y empatando con el lunes en la misma jornada para el valor más alto de PM₁₀, destacando en particular el PM_{2.5} por superar los límites establecidos por la OMS (2022). No obstante, todos los resultados se encuentran dentro de los límites establecidos por la resolución 2254 de 2017 y de manera general, se clasifican como “Aceptable” según el ICA.

7.2.5. *Domingo*

Para el domingo se registraron mediciones únicamente durante la jornada de la tarde. Estos datos se presentan como un componente de información adicional que no fue contemplado en el planteamiento metodológico inicial. Sin embargo, tal como se menciona en la metodología, se adoptaron como complemento al análisis, aprovechando la disponibilidad de tiempo durante el periodo de los 6 meses de muestreo para incluir esta información. En este sentido, a pesar de que este día no forma parte del diseño original del estudio, sus datos se utilizan como referencia comparativa respecto al resto de los días de medición.

Es importante resaltar que la información obtenida corresponde únicamente a cuatro días de mediciones en los cuales se completaron las seis horas requeridas para la jornada de la tarde. No se siguió la metodología adecuada y planteada inicialmente para garantizar la representatividad de las mediciones, por lo que estos datos pueden ser considerados una aproximación preliminar que permite un primer vistazo al comportamiento de los contaminantes durante este día.

Por otro lado, los resultados del análisis para este día deben tener en consideración un conjunto de aspectos como el tráfico vehicular en la zona, el cual es variable en función de los eventos del domingo o días festivos o factores como la temporada seca, temporada en la cual se presenta una disminución de precipitaciones lo que aumenta la presencia de PM en el aire, factores que indica la CVC en su artículo sobre las posibles causas de contaminación del aire en Cali (CVC, 2020). No obstante, no se llevó a cabo un registro detallado de las condiciones atmosféricas durante los días de muestreo, ni se optó por realizar un análisis más detallado mediante otras fuentes de información, dado a que el apartado no hace parte del planteamiento metodológico inicial del estudio. Adicionalmente, debido al descarte de ciertas jornadas y a la posterior consolidación de la información, se decidió no incluir en el análisis las variables ambientales asociadas.

La distribución correspondiente al PM₁₀ se observa en el Grafico 15 y para PM_{2.5} en el Grafico 16.

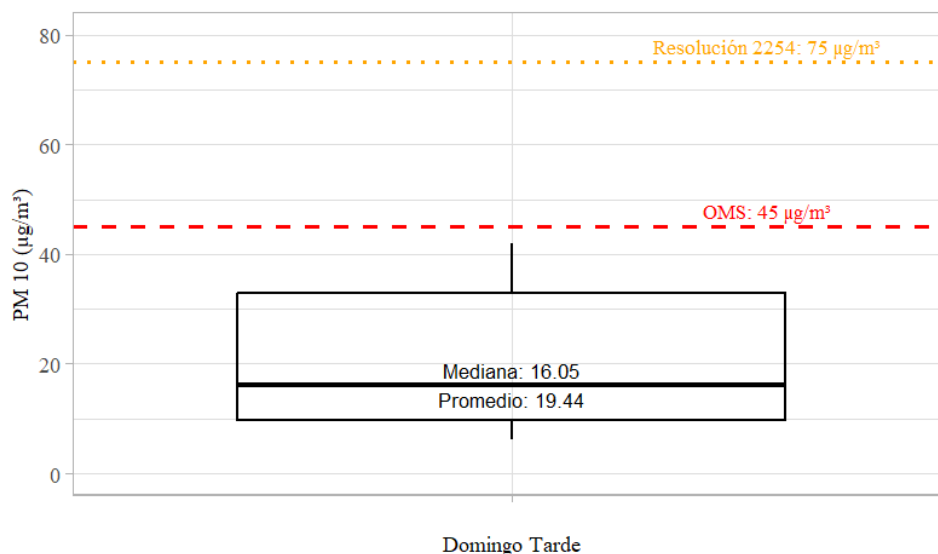


Gráfico 15. PM_{10} domingo (tarde)

Fuente: Elaboración propia.

El PM_{10} cuenta con un promedio de 19.44 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y la mediana con 16.05 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, ambos valores por debajo de los límites establecidos por la OMS y la resolución 2254. Corresponde a una clasificación “Bueno” según el ICA.

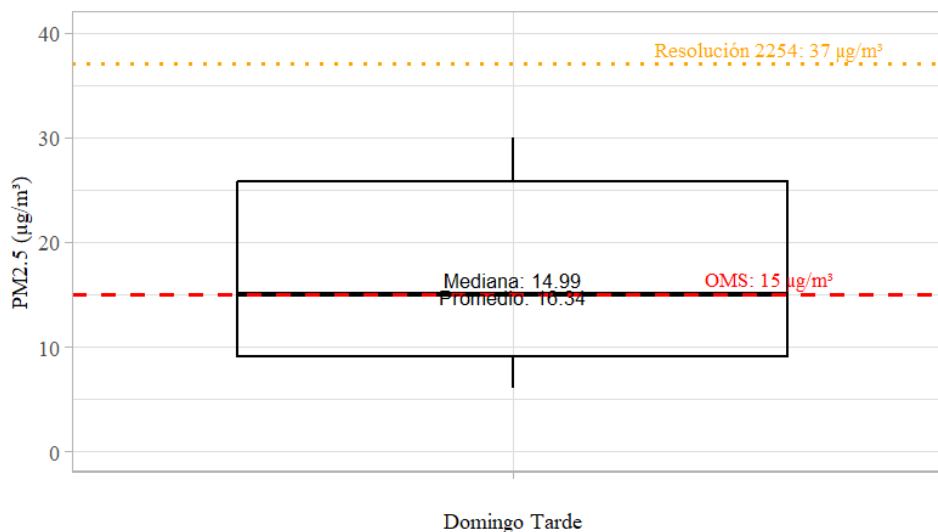


Gráfico 16. $\text{PM}_{2.5}$ domingo (tarde)

Fuente: Elaboración propia.

El PM_{2.5} presenta un promedio de 16.34 µg/m³ y una mediana de 14.99 µg/m³, superando los límites establecidos por la OMS, no obstante, se encuentran bajo los límites de la resolución 2254. Los resultados corresponden a una clasificación “Aceptable” según el ICA.

Al analizar la jornada, se evidencia que el domingo cuenta los promedios más altos para ambos tipos de material particulado al compararse con el resto de los días, alcanzando un promedio de 19.44 µg/m³ para PM₁₀ y 16.34 µg/m³ para PM_{2.5} superando los resultados obtenidos previamente. De esta manera, considerando que las mediciones se realizaron únicamente durante dicha jornada, el domingo presenta los niveles de contaminación por material particulado más elevados en comparación con los otros días de muestreo.

Sin embargo, no puede catalogarse como un día crítico debido a factores mencionados previamente, como la limitación de contar solo con datos de una única jornada (tarde) y la falta de mediciones suficientes para asegurar una mayor representatividad. Pese a esto, los niveles observados no difieren de forma exagerada de los demás días, pero resaltan por ser más altos, lo cual podría atribuirse a la incidencia de factores específicos ocurridos durante la jornada de muestreo, como la intensidad del tránsito vehicular en zonas puntuales, condiciones meteorológicas locales que favorecen la suspensión del material particulado y eventos particulares que pueden haber influido en la generación y concentración de estos contaminantes.

7.3. Análisis de mediciones y determinación de concentraciones por días compuestos

Posterior a la depuración de los datos obtenidos por jornada, como punto comparativo, se realizaron diagramas de cajas para cada día de muestreo de la misma manera empleando la totalidad de los registros por día de muestreo (correspondientes a la integración de los datos obtenidos por jornadas) con excepción del domingo, debido a que este día no cuenta con mediciones para ambas jornadas. Estos diagramas facilitan la comparación entre los datos de obtenidos para cada jornada y proporcionan una visión más completa de la totalidad de los registros.

7.3.1. *PM₁₀ días compuestos*

A continuación, se presentan los diagramas de caja correspondientes a los días de muestreo: lunes, miércoles, viernes, sábado para PM₁₀, representados de manera respectiva a los Gráficos 17, 18, 19 y 20.

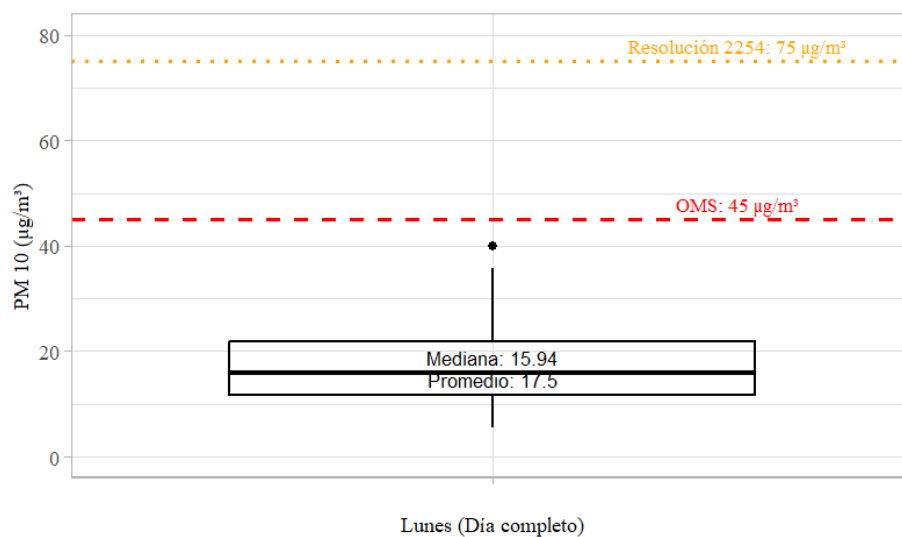


Gráfico 17. PM₁₀ lunes

Fuente: Elaboración propia.

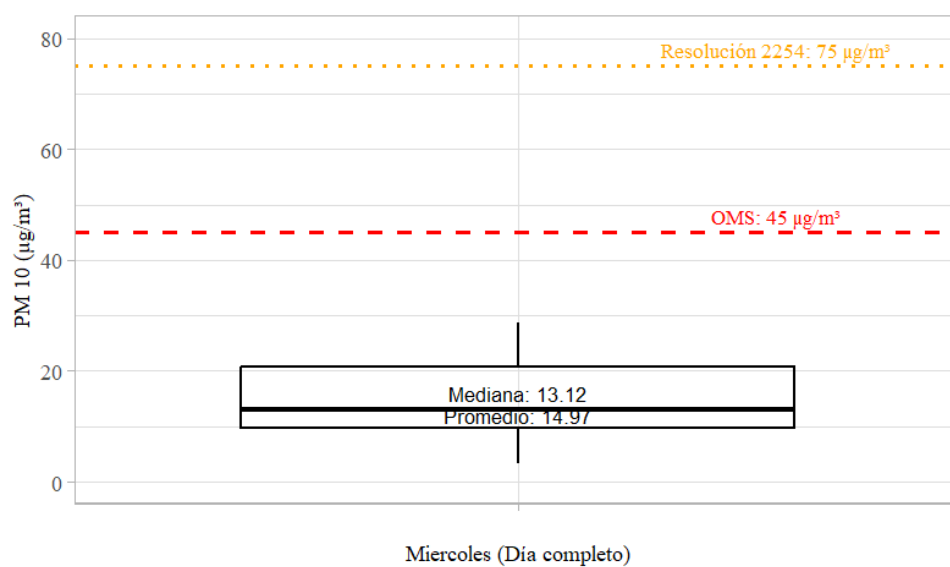


Gráfico 18. PM₁₀ miércoles

Fuente: Elaboración propia

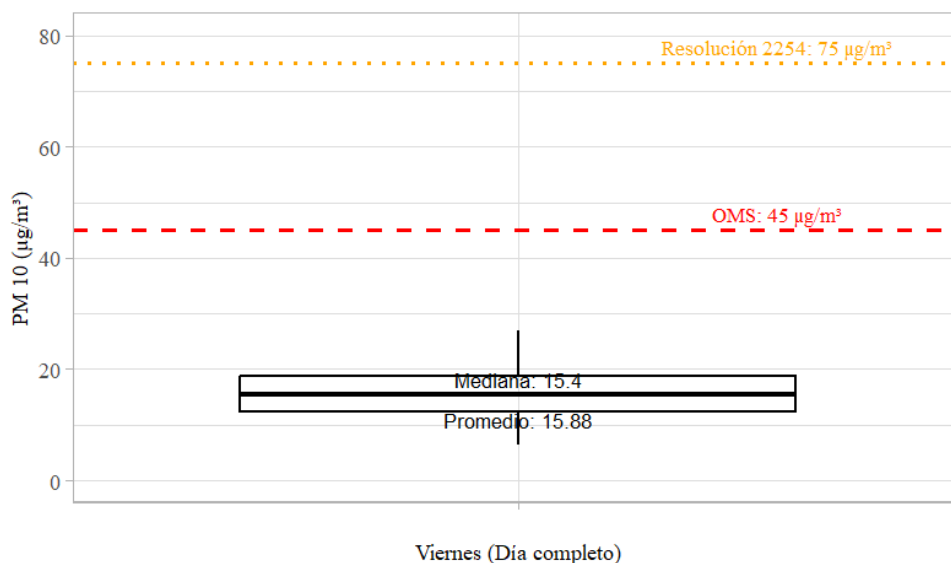


Gráfico 19. PM₁₀ viernes

Fuente: Elaboración propia.

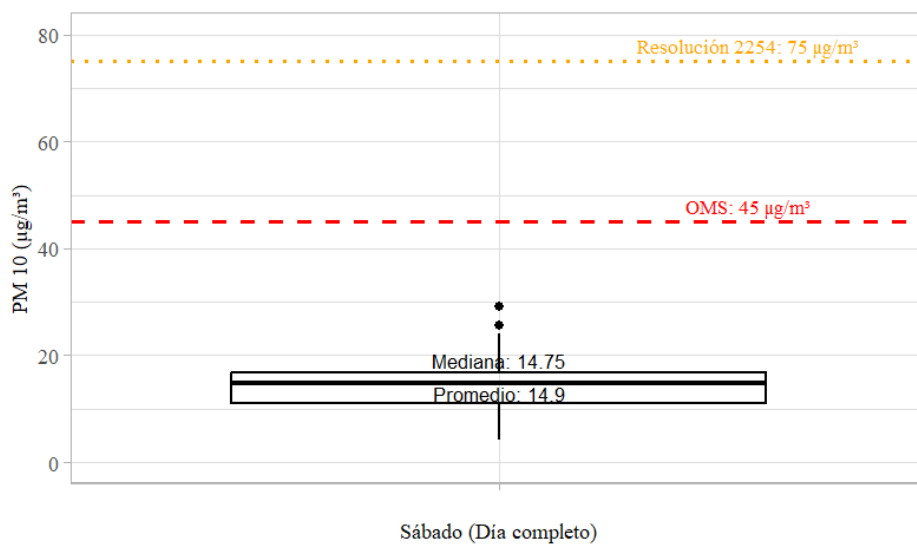


Gráfico 20. PM₁₀ sábado

Fuente: Elaboración propia.

Se evidencia que, para el PM₁₀, todos los días se encuentran bajo los límites establecidos por la OMS y la resolución 2254, de la misma manera que en la revisión por jornadas. Destacan los valores extremos registrados el lunes (visibles en el diagrama de cajas), alcanzando niveles de hasta $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Este día, además, se presenta como con el promedio más elevado, siendo este de $17.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, resultado que puede justificarse debido al inicio de semana, donde se presenta una mayor cantidad de viajes por transporte, y, por ende, existe un aumento en las fuentes

estacionarios que generan material particulado y otros contaminantes. No obstante, este resultado sigue siendo superado por el registrado para el domingo en la jornada el cual alcanza un promedio de $19.44 \mu\text{g}/\text{m}^3$. De manera general, la calidad del aire se clasifica como “Buena” según el ICA para este contaminante.

Es importante que, a diferencia de los resultados obtenidos por jornada, donde el sábado presenta los niveles más altos para la jornada de la tarde y el miércoles para la jornada de la mañana (excluyendo al domingo, que solo cuenta con mediciones para la jornada de la tarde), el lunes presenta los niveles más altos para la jornada compuesta (día completo). Esto puede atribuirse al proceso realizado para la depuración de los datos, el cual se realizó de manera individual para cada jornada como para el día completo, lo que implica un manejo de diferentes promedios y estándares.

Aunque no se logra evidenciar una causa o razón específica para los resultados con discrepancia respecto a las jornadas de manera correspondiente a los días de muestreo, puede relacionarse a la cantidad total de mediciones realizadas y consideradas como también a los datos empleados para la creación de los diagramas, lo que podría inclinar del promedio general a un valor ligeramente superior a los resultados obtenidos por jornadas respecto a los días compuestos. Adicionalmente, el método de análisis y la estrategia empleada puede influir en esta variación. Por esta razón no es posible realizar una comparación y correlación directa entre los resultados obtenidos por jornada y los correspondientes para día compuesto para este contaminante.

7.3.1. *PM_{2.5} días compuestos*

Los diagramas de caja correspondientes a los días de muestreo para PM_{2.5}, representados de manera respectiva al lunes, miércoles, viernes y sábado en los Gráficos 21, 22, 23, y 24:

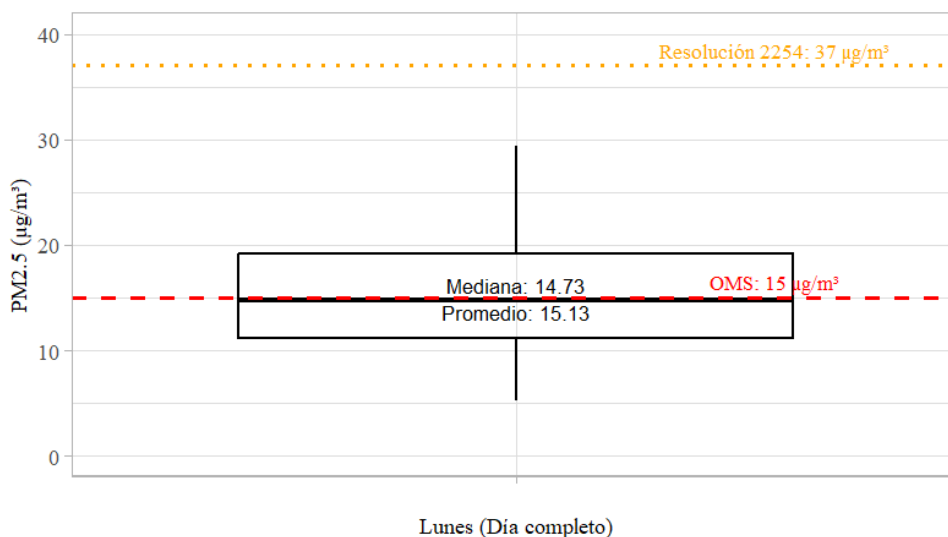


Gráfico 21. PM_{2.5} lunes

Fuente: Elaboración propia.

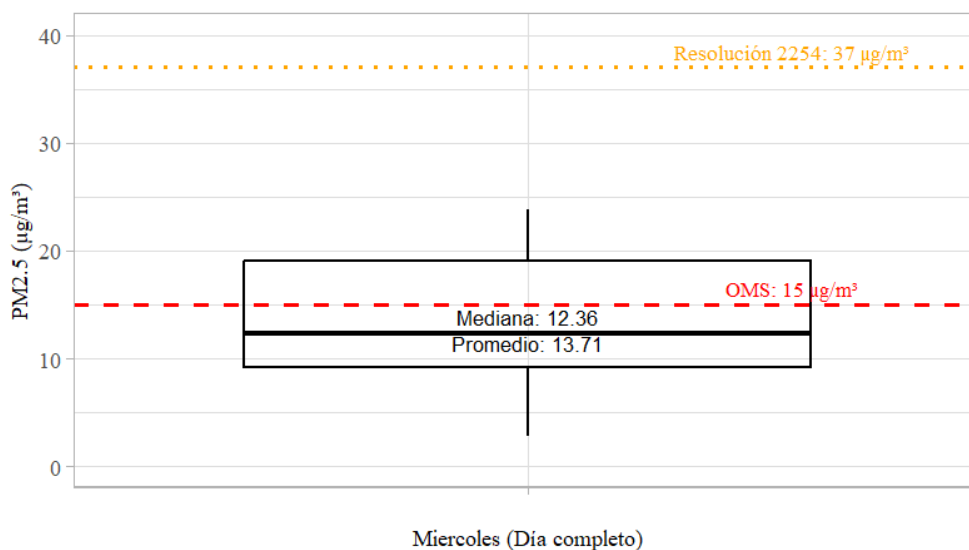


Gráfico 22. PM_{2.5} miércoles

Fuente: Elaboración propia.

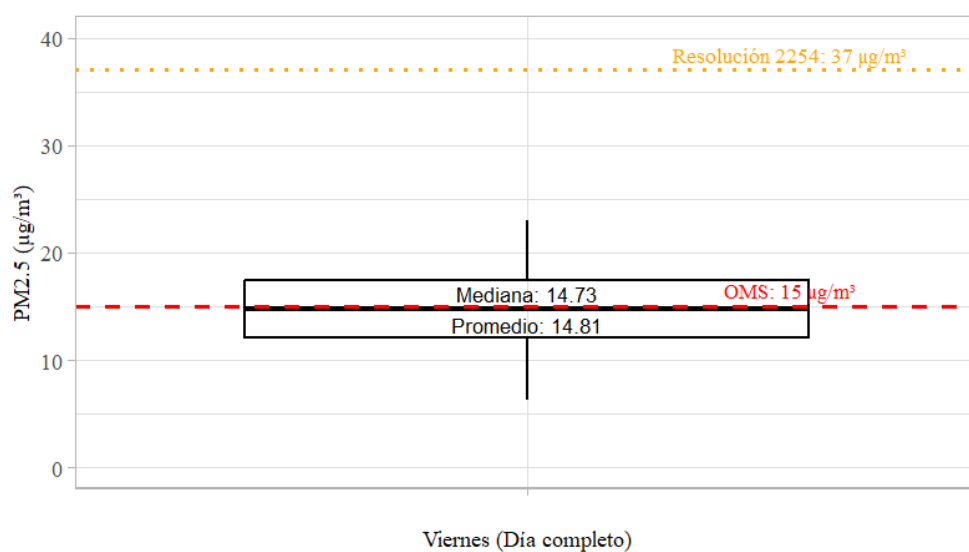


Gráfico 23. PM_{2.5} viernes

Fuente: Elaboración propia.

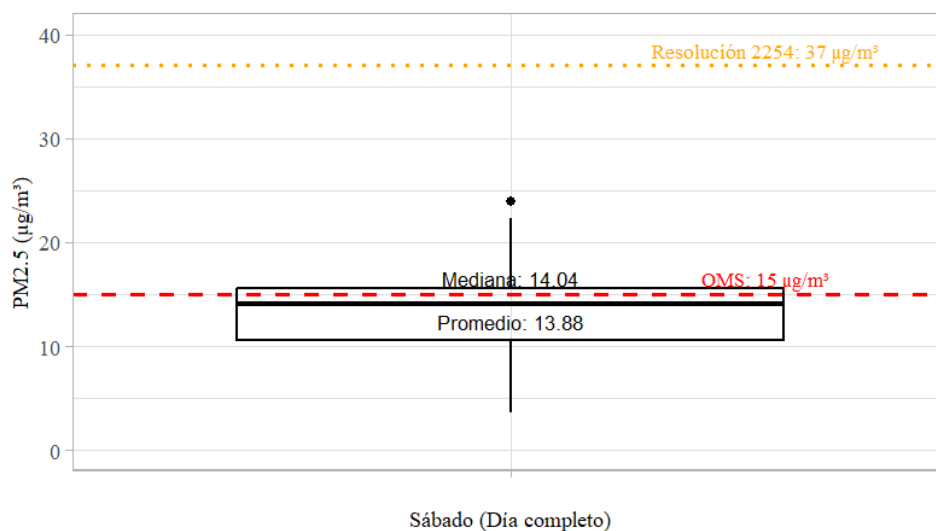


Gráfico 24. PM_{2.5} sábado

Fuente: Elaboración propia.

Se evidencia que, para el PM_{2.5}, el único día en superar los límites establecidos por la OMS es el lunes con un promedio de 15.13 µg/m³ y valores extremos que se acercan a los 30 µg/m³. Este día también registra los niveles más altos en comparación con los demás días de muestreo. Sin embargo, estos resultados se mantienen dentro de los límites establecidos por la resolución 2254 y se clasifican de manera general con una calidad de aire “Buena” según el ICA.

De manera similar a lo evidenciado previamente para el PM₁₀ en los resultados correspondientes a días compuestos, los valores obtenidos para el PM_{2.5} se diferencian a los obtenidos por jornadas. Para este caso, el lunes con el promedio más alto con 15.13 µg/m, a diferencia del identificado en las jornadas correspondiente al miércoles por la mañana donde se alcanzan los niveles más altos (nuevamente excluyendo al domingo, que solo cuenta con registros de la tarde). Consecuentemente, al obtener los resultados más elevados, se establece el lunes como día crítico el de referencia.

Se evidencia que los resultados obtenidos para las jornadas individuales pueden ser analizados de forma independiente a los días compuestos, dependiendo de los objetivos y la metodología que se deseen aplicar, como por ejemplo en evaluaciones que se centran en una única jornada.

Un ejemplo claro de este apartado se evidencia en los resultados obtenidos para el sábado, dado que, la jornada de la tarde presentó el valor medio más alto de PM_{2.5}, siendo la única jornada en superar los límites de la OMS de entre todas las jornadas correspondientes a los días de muestreo para este contaminante, pese a esto, el valor medio más alto para este contaminante evaluado para días compuestos corresponde al lunes y no al sábado. Por esta razón, tampoco es posible establecer una relación directa entre los resultados obtenidos por jornada y los correspondientes al día compuesto para este contaminante (PM_{2.5}).

En este sentido, se elige el lunes compuesto como referencia de día crítico, contando con una integración de datos más completa y representativa para la totalidad del día. Este apartado es

fundamental para determinaciones posteriores, relacionadas a la exposición y las comparaciones frente a niveles registrados por autoridades ambientales.

7.3.2. Registro de mediciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$

El registro de mediciones representa el valor promedio referente a la concentración de PM para cada día en el histórico de mediciones empleando como fuente los resultados obtenidos en los días compuestos, permitiendo analizar la variación temporal de los datos e identificar los días con valores altos mediante el uso de colores que concuerdan con los establecidos por el ICA según la resolución 2254 de 2017. A continuación, se presenta la variación correspondiente al PM_{10} (Grafico 25):

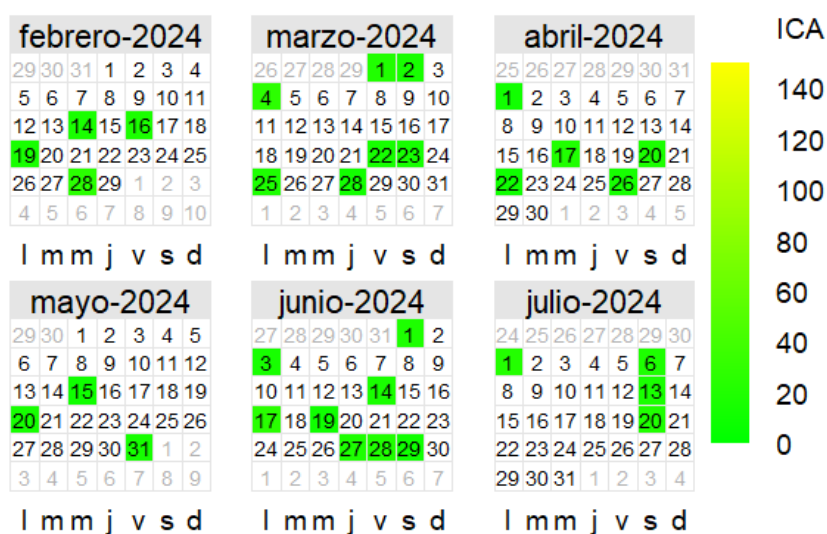


Grafico 25. Registro mediciones PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Fuente: Elaboración propia.

Aunque no se evidencia con facilidad, las concentraciones promedio para PM_{10} alcanzan los niveles más elevados en los días 28 de febrero, 4 de marzo y 17 de junio, con valores sobre los $26 \mu\text{g}/\text{m}^3$, identificados en el grafico con verdes más claros. Los meses de marzo y junio registran la mayor cantidad de días con concentraciones elevadas, esto puede deberse a factores estacionales, como temporadas lluviosas donde se sedimenta el material particulado, o temporadas de mayor actividad productiva. Adicionalmente, la variabilidad notable entre días de un mismo mes puede evidenciar que los niveles del contaminante están influenciados por eventos específicos y variaciones meteorológicas constantes. En el Grafico 26 se presenta el registro de mediciones para $PM_{2.5}$:

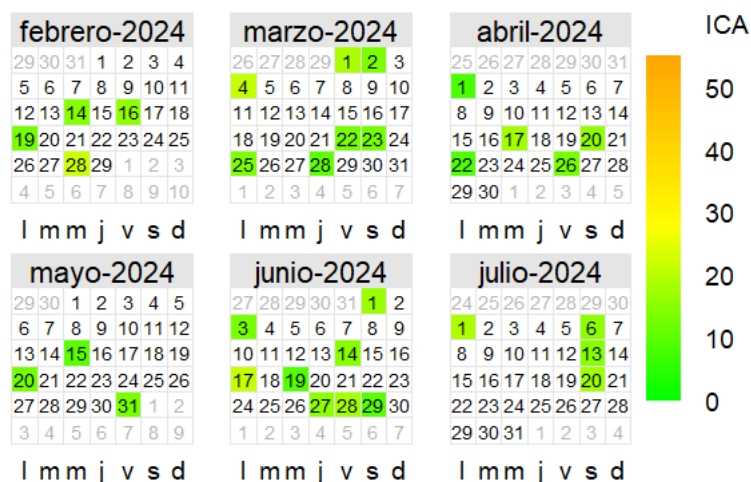


Gráfico 26. Registro mediciones $PM_{2.5}$

Fuente: Elaboración propia.

Para las concentraciones promedio de $PM_{2.5}$, se evidencia los niveles más elevados se presentan en los días 28 de febrero, 4 de marzo y 17 de junio, con valores sobre los $22 \mu g/m^3$, identificados en el grafico con tonos amarillos, estos resultan ser también los evidenciados para el PM_{10} , reforzando la relación entre ambos contaminantes. Nuevamente, los meses de marzo y junio registran la mayor cantidad de días con concentraciones elevadas como es el caso del PM_{10} . También se cuenta con una variabilidad notable entre días de un mismo mes puede evidenciar que los niveles del contaminante están influenciados por eventos específicos y variaciones meteorológicas constantes.

Al comparar los resultados obtenidos mediante los gráficos de registro para ambos contaminantes, se observan patrones de variación temporal similares, con niveles elevados que coinciden en días y meses. Corroborando la correlación entre ambos contaminantes y sugiere la posible influencia de factores comunes como lo son las fuentes de emisión para dichos comportamientos.

El Grafico 27 presenta la distribución temporal de las concentraciones promedio para PM_{10} y $PM_{2.5}$, como complemento a los apartados anteriores lo que permite una mayor comprensión en la dinámica de los contaminantes.

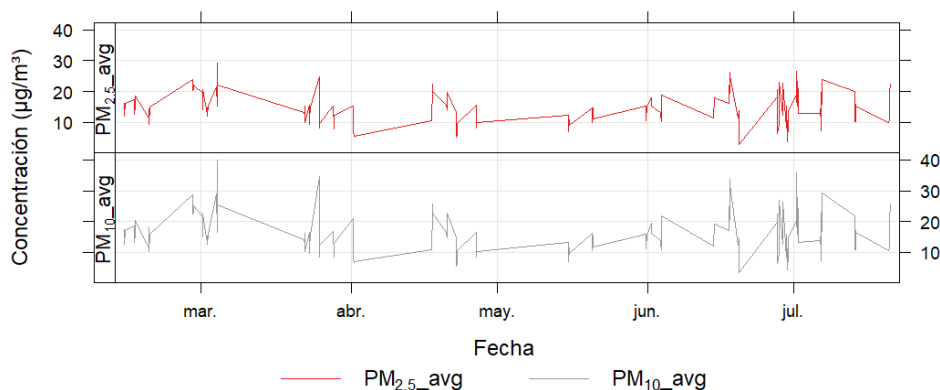


Gráfico 27. Registro lineal de mediciones PM_{10} y $PM_{2.5}$

Fuente: Elaboración propia.

Este resultado, que se presenta como un complemento a los previamente descritos, permite una comprensión mayor en la dinámica de los contaminantes, evidenciando una tendencia similar entre $PM_{2.5}$ y PM_{10} , con picos de concentración en fechas coincidentes, especialmente destacados en los meses de marzo y junio como se describe en el apartado anterior, en estos se registran los valores más altos para PM_{10} . Además, de manera general se observa que los valores promedio de $PM_{2.5}$ se mantienen por debajo de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que PM_{10} presenta una mayor variabilidad, alcanzando picos cercanos a $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Por último, aunque no se identifica una tendencia clara a lo largo de los meses, a finales de junio e inicios de julio se registran picos más pronunciados. Al igual que los días 28 de febrero, 4 de marzo y 17 de junio, este comportamiento posiblemente esté asociado a cambios meteorológicos y/o actividades específicas durante el período de muestreo, destacando un tráfico vehicular que se mantuvo constante, aunque con variaciones en horarios cotidianos.

7.3.3. Relación entre concentraciones promedio de PM_{10} y $PM_{2.5}$

La relación entre las concentraciones promedio de PM_{10} y $PM_{2.5}$ se obtuvo mediante un gráfico de dispersión, esta correlación les da validez a los datos obtenidos en el muestreo e identifica datos atípicos. Esta distribución se observa en el Gráfico 28.

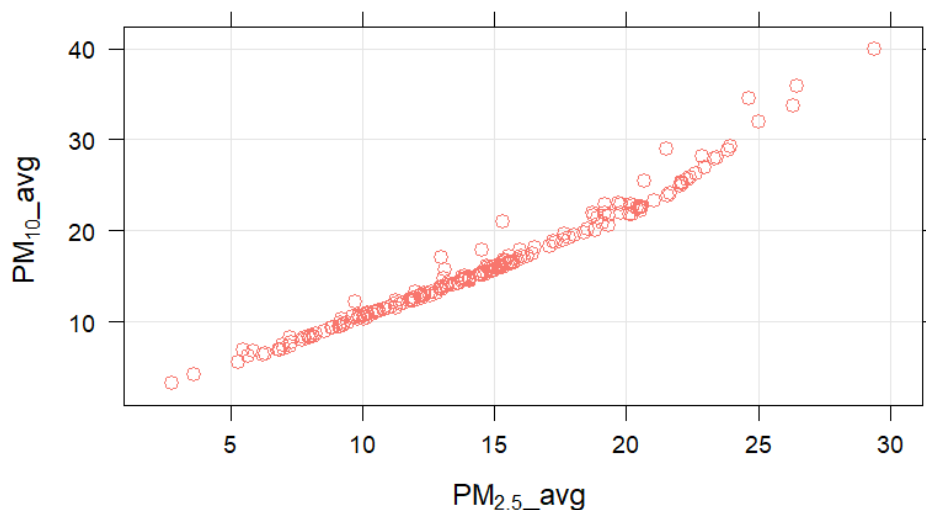


Gráfico 28. Relación concentraciones promedio $PM_{2.5}$ y PM_{10}

Fuente: Elaboración propia.

Se evidencia, de forma visual, una relación positiva entre las concentraciones de $PM_{2.5}$ (eje X) con promedios que se distribuyen entre $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con las de PM_{10} (eje Y) con promedios distribuidos entre $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, evidenciando una tendencia ascendente donde los valores de $PM_{2.5}$ y PM_{10} aumentan en conjunto. Además, se observa una ligera dispersión, la cual destaca en los niveles más altos, donde las concentraciones elevadas de PM_{10} se hacen más evidentes con una mayor pendiente.

Para evaluar a mayor profundidad estos resultados, es posible hacer una identificación de los puntos con los días correspondientes. El resultante de este apartado se evidencia en el gráfico 29.

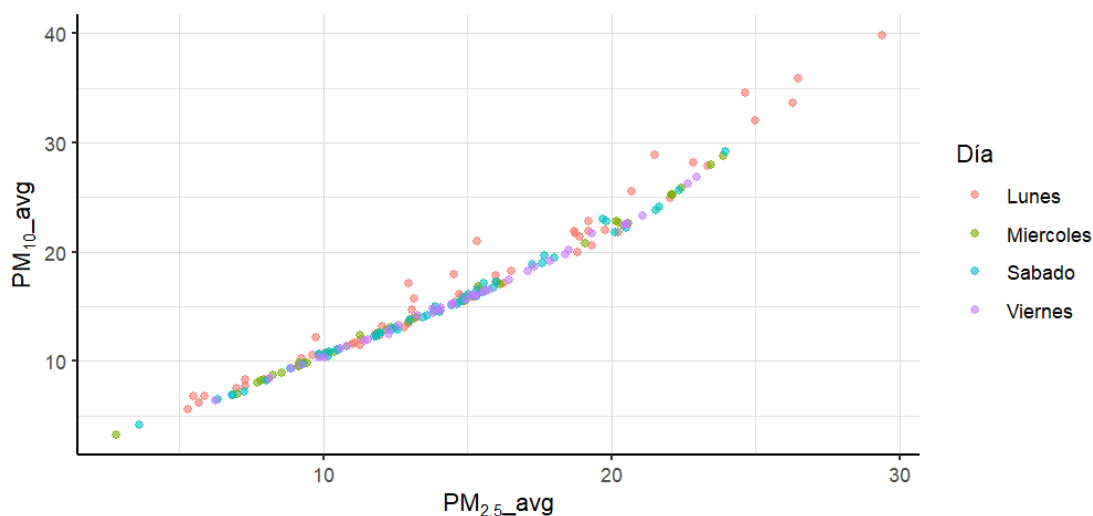


Gráfico 29. Relación concentraciones promedio $PM_{2.5}$ y PM_{10} por días

Fuente: Elaboración propia.

Mediante la gráfica, es posible evidenciar que los puntos de mayor dispersión son los del lunes, reforzando su elección como día crítico y el hecho de que este presenta una mayor influencia dadas las dinámicas ambientales y actividades de inicio de semana las cuales intensifican la carga contaminante como el uso de transporte masivo a inicio de semana laboral.

En ambas graficas de dispersión tambien es posible diferenciar dos apartados, una agrupación entre los valores obtenidos para concentraciones menores a $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y otra a partir de ese umbral. El rango inferior, que se presenta con mayor estabilidad, puede sugerir una mejor dispersión de los contaminantes por condiciones ambientales o una reducción en las emisiones, como puede ser una ligera brisa, lluvia o una menor actividad y tráfico en los puntos de muestreo. Por su parte, el rango superior indica lo opuesto, con una mayor dispersión entre los datos, puede deberse a una mayor actividad y tráfico, eventos específicos como episodios de quemas, construcciones u otros y la presencia de variables ambientales que faciliten el asentamiento de partículas.

Teniendo como objeto evaluar la fuerza y consistencia de la relación entre las concentraciones de ambos contaminantes, se aplicaron los metodos estadísticos de linealidad y la correlación de Spearman en RStudio. Como resultado se obtuvieron los valores de pendiente, R^2 y probabilidad (coeficiente de Spearman) evidenciadas en el grafico 30.

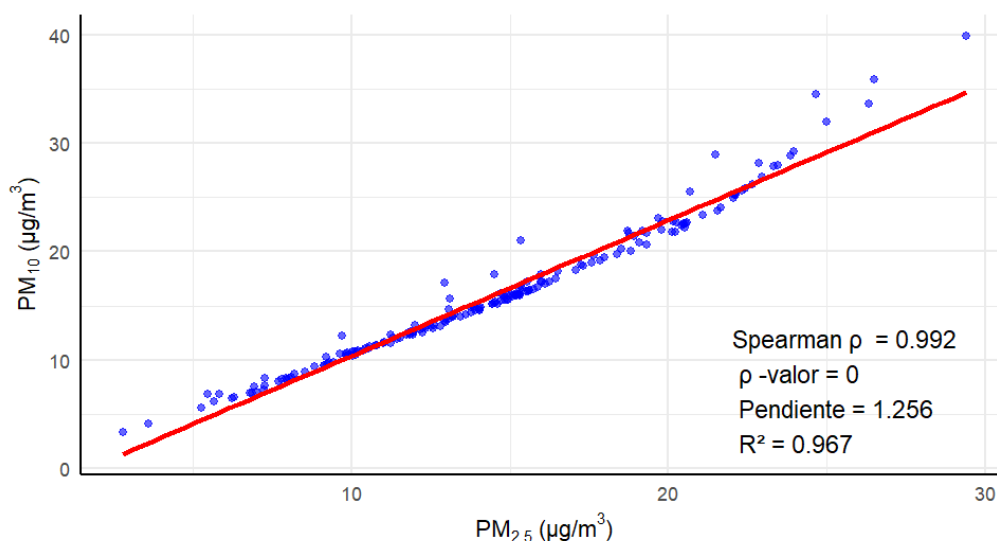


Gráfico 30. Asociación estadística entre PM_{2.5} y PM₁₀

Fuente: Elaboración propia.

La determinación de la pendiente, mediante la función “*lm()*” en el software de Rstudio, correspondiente a un modelo lineal simple entre la variación de PM₁₀ y PM_{2.5}. Como resultado se obtiene 1.256, lo que implica que por cada $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM_{2.5} se alcanza un promedio de 1.256 PM₁₀. En este sentido, se refuerza la relación positiva entre ambos contaminantes evidenciada anteriormente, destacando el PM₁₀ por presentar fracción de aumento mayor, posiblemente por material suspendido de los procesos de combustión en las áreas de muestreo o incluso una combinación de las partículas más finas que forman agregados más grandes. Mediante la función

del software también es posible determinar el coeficiente de determinación, el cual explica la variabilidad entre las variables. El resultado es un $R^2 \approx 0.97$ (97%) reforzando nuevamente la relación lineal previamente expuesta entre ambos contaminantes.

Por su parte, la correlación de Spearman es útil dado a que permite identificar relaciones incluso si los datos no siguen una distribución normal o presentan valores atípicos, descartando así posibles interpretaciones erradas por datos atípicos. En el análisis se obtuvo un valor de $\rho = 0.992$ con un p-valor ≈ 0 , lo que refuerza la asociación positiva y estadísticamente significativa entre los contaminantes, de igual manera al método lineal, a medida que aumentan los niveles de $PM_{2.5}$, los de PM_{10} también lo hacen de manera consistente, respaldando los resultados obtenidos mediante el modelo lineal, en donde la pendiente y el coeficiente de determinación también mostraron una relación sólida entre ambos contaminantes, confirmando así que se comparten dinámicas en las fuentes de emisión y procesos de dispersión.

Los resultados obtenidos son comparables en su metodología y análisis de resultados con el estudio realizado en Guncheng, China. En el estudio determinaron que la relación entre diferentes contaminantes y su incidencia en los casos de hipertensión, al evaluar la relación entre $PM_{2.5}$ y PM_{10} , obtuvieron un coeficiente de Spearman de 0.958 ($p < 0.001$), indicando una relación estadísticamente alta y positiva, lo que reforzó la correlación de ambos contaminantes. Además, dada esta correlación, realizaron un modelo de estimación de la relación lineal con regresión de Poisson, determinando que, en exposiciones prolongadas, un aumento de $10 \mu g/m^3$ está asociado con un incremento del 13.41% para $PM_{2.5}$ y 7.29% para PM_{10} en hospitalizaciones por casos de hipertensión (Li et al, 2022).

7.3.4. *Evaluación de la dispersión de $PM_{2.5}$ y PM_{10} mediante rosas de contaminantes*

Para el estudio, se emplea la técnica de rosas de contaminantes, su implementación busca aportar evidencia gráfica y cuantitativa para vincular las condiciones meteorológicas con la exposición de los contaminantes. Al visualizar la distribución de los contaminantes, es posible analizar sus patrones de distribución espacial y temporal, concretando así la dirección origen de los aportes, es decir, fuentes de contaminación (Abdulmalik et al, 2025). Los datos de velocidad y dirección del viento empleados para la modelación de las rosas de contaminantes provienen de la información registrada y publicada en el Sistema de Información sobre Calidad del Aire [SISAIRE] (IDEAM, 2025).

Es importante aclarar que los datos de velocidad del viento se promedian en R studio utilizando un método aritmético convencional, mientras que la dirección del viento se calcula mediante el promedio de sus componentes cartesianas (u y v), obteniendo un valor medio representativo que refleja adecuadamente los datos consolidados por mes. Por último, se recuerda que los días de muestreo considerados para la consolidación mensual corresponden a los establecidos en la metodología, excluyendo entonces el domingo, cuyos datos fueron utilizados únicamente como un análisis inicial para ese día específico y no forman parte del conjunto principal de datos.

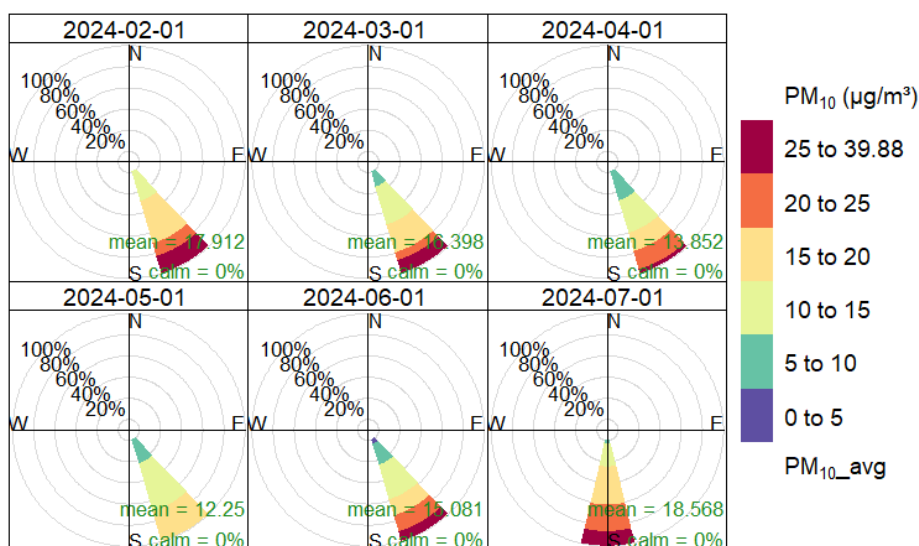
A continuación se presenta el valor mensual para dirección y velocidad del viento, requerido para la elaboración de las rosas obtenidos de SISAIRE (Tabla 7):

Tabla 7. Velocidad y dirección de los vientos

Mes	Velocidad (m/s)	Dirección (°)
Febrero	0.79	157.01
Marzo	0.80	159.44
Abril	0.75	154.90
Mayo	0.67	154.11
Junio	0.68	155.70
Julio	0.70	174.29

Fuente: (IDEAM, 2025)

A continuación, se presenta las rosas de contaminantes para PM₁₀ (grafico 31) y PM_{2,5} (grafico 32):



Para el PM₁₀ se evidencia que la dispersión del contaminante se encuentra mayormente sobre el sureste (SE), indicando que los vientos provienen del noroeste (NW). Con una concentración media que se mantiene en cumplimiento con la resolución 2254 de 2017 y las recomendaciones de la OMS (2022), pero con una variación notoria entre meses, siendo julio el de media mayor con 18.57 µg/m³, este comportamiento no se relaciona directamente con la velocidad del viento, dado que julio presenta una velocidad media baja en comparación con los otros meses. En este sentido, puede atribuirse el aumento a la temporada seca (verano) que facilita la resuspensión de partículas por las condiciones de baja humedad y a la naturaleza mayoritaria de las fuentes, las cuales son principalmente móviles.

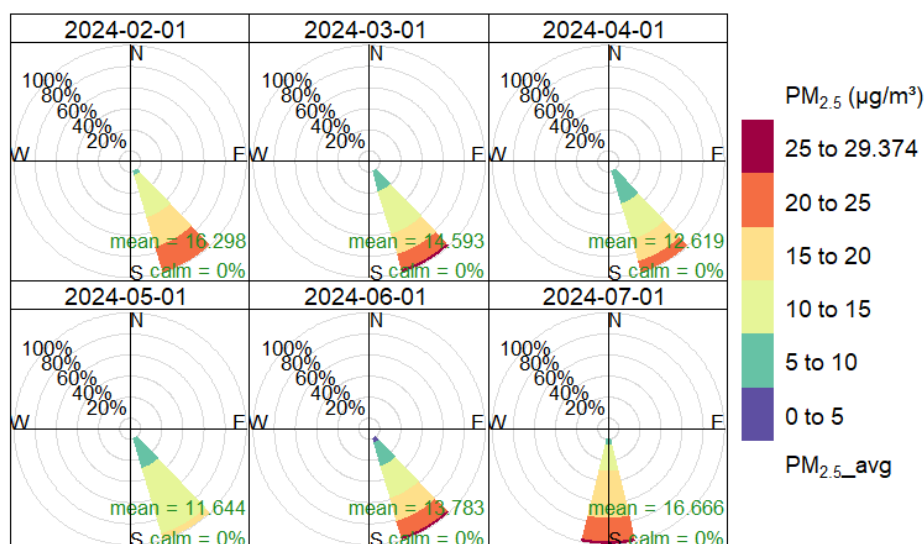


Gráfico 32. Rosa de contaminantes $PM_{2.5}$

Fuente: Elaboración propia.

Para el $PM_{2.5}$ se evidencia un comportamiento similar, la dispersión del contaminante se encuentra mayormente sobre el sureste (SE), indicando vientos provienen del noroeste (NW). Una concentración media que se mantiene en cumplimiento la resolución 2254 de 2017, pero superando las recomendaciones de la OMS (2022) para la febrero y julio. De igual manera, la variación entre meses sigue siendo notoria, siendo julio el de media mayor con $16.66 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Ambos contaminantes comparten una tendencia muy similar, lo que refuerza la relación entre ellos en el estudio. Las rosas de viento evidencian una concentración predominante hacia el noroeste, aunque es importante destacar que los datos de dirección y velocidad del viento, aunque variables entre meses, son los mismos para ambos contaminantes. Esto indica que los vientos arrastran el material particulado hacia esta dirección, señalando además la posible influencia de fuentes fijas ubicadas en la dirección opuesta, sobre la cual no fue realizado un estudio o identificación. Cabe aclarar que este factor no fue evaluado en profundidad debido a la carencia de información detallada, la ausencia de una investigación exhaustiva que permita identificar las fuentes externas al área de estudio y, finalmente, resalta la dominancia de las fuentes móviles, que ejercen mayor influencia en la zona bajo el objeto de este estudio. Aun así, es plausible considerar que material proveniente de quemas, obras civiles no identificadas y fábricas no monitoreadas podría jugar un papel crítico en el transporte de partículas hacia el noroeste, como reflejan los resultados obtenidos.

Por otra parte, el análisis de $PM_{2.5}$ muestra concentraciones que superan las recomendaciones de la OMS (2022), lo que implica un riesgo potencial para la salud, especialmente en los periodos con valores promedio más elevados, como febrero y julio, siendo este último el mes con la concentración media más alta. Este resultado puede relacionarse con la dinámica de las condiciones ambientales, ya que, según a inicios de año Colombia experimentó la influencia del

fenómeno de El Niño, que tiende a reducir las lluvias y favorecer condiciones de sequía. Según reportes climáticos, en junio de 2023 ya se había instaurado “El Niño” y los pronósticos señalaban una alta probabilidad de que esta condición se mantuviera hasta inicios del año 2024 (Martínez, 2023), resultando en menores precipitaciones (temporada seca) y, por tanto, en una mayor resuspensión de partículas en el ambiente.

Como complemento a este análisis, a continuación, se presenta la rosa de contaminantes correspondiente al mes de julio, periodo el cual registra las mayores concentraciones medias para material particulado. La figura 11 contrasta en el mapa la zona de estudio donde se realizaron las mediciones y la estación de monitoreo de Jamundí, ubicada a una distancia aproximada de 710 metros respecto al punto G.

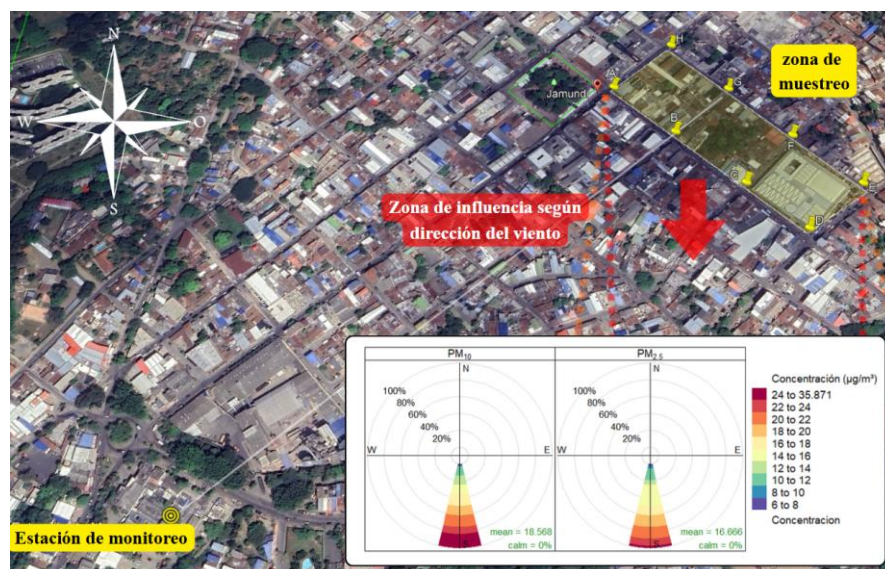


Figura 11. Dispersión y rosa de contaminantes mes de julio

Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth (2025)

La figura ilustra el contexto espacial del área de estudio y la dinámica de dispersión de los contaminantes. Dado que la dispersión del material particulado es predominante en dirección sur, arrastrado por los vientos, se extiende la zona de influencia a lo largo de ese eje. Esta dinámica sugiere impactos directos en áreas donde predominan establecimientos comerciales de alta concurrencia y viviendas distribuidas en la zona de muestreo. Además, en escenarios de mayor dispersión o episodios de alta carga contaminante, la pluma de contaminación podría alcanzar áreas sensibles como el hospital de Jamundí (ubicado en la misma ubicación de la estación de monitoreo) y posteriormente afectar zonas residenciales aledañas, incrementando el riesgo para la salud pública local.

7.4. Análisis por punto de muestreo

La determinación de niveles por punto de muestreo se obtiene con referencia al día crítico lunes. (determinado en el análisis por días compuestos) constando de un apartado de jornadas y día compuesto, como se realizó en apartados previos.

7.4.1. Determinación para jornadas

La distribución obtenida para los puntos de muestreo en la jornada de la mañana se presenta en el mapa de calor (Gráfico 33) y el diagrama de barras comparativo (Gráfico 34) a continuación:

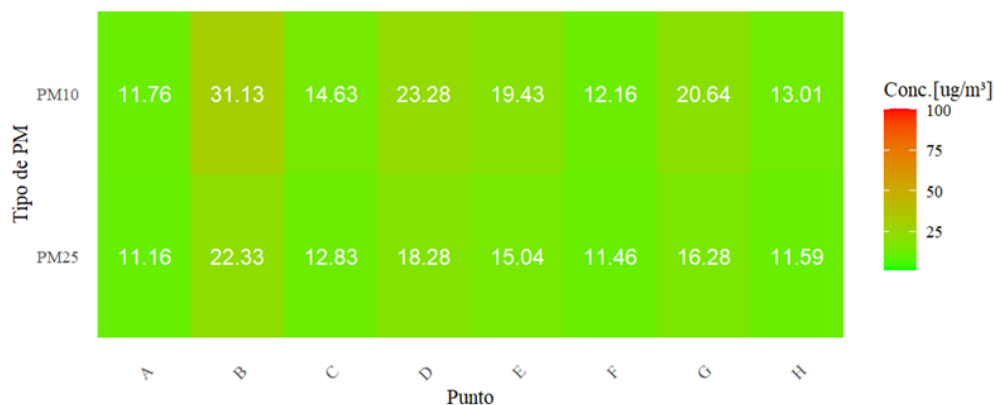


Gráfico 33. Mapa de calor puntos de muestreo (jornada de mañana)

Fuente: Elaboración propia.

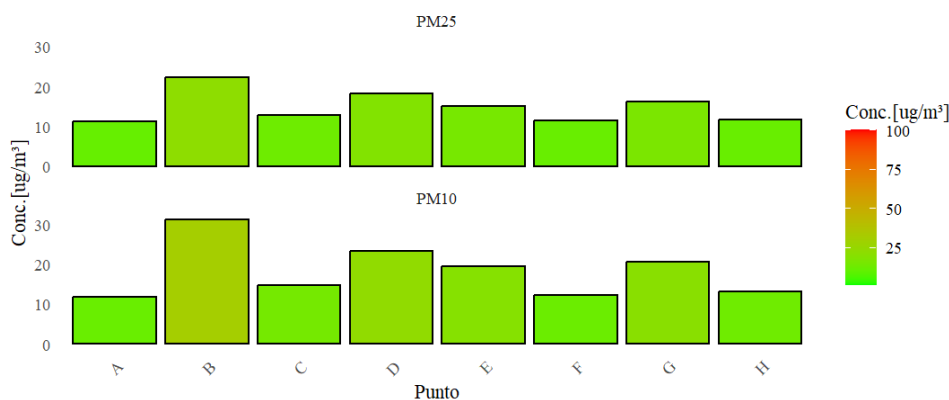


Gráfico 34. Diagrama de barras puntos de muestreo (jornada de mañana)

Fuente: Elaboración propia.

Al observar los gráficos para la jornada de mañana, el punto B presenta las mayores concentraciones promedio de ambos contaminantes, con un valor de 31.13 para PM_{10} y 22.33 para $PM_{2.5}$, mientras que los puntos F y H registran las concentraciones más bajas. Es de resaltar que la variación de PM_{10} es más notoria en comparación la evidenciada para $PM_{2.5}$, alcanzando picos más elevados sobre los mismos puntos de muestreo, lo cual refuerza la correlación entre los contaminantes.

La distribución obtenida para los puntos de muestreo en la jornada de la tarde se presenta en el mapa de calor (Gráfico 35) y el diagrama de barras comparativo (Gráfico 36) a continuación:

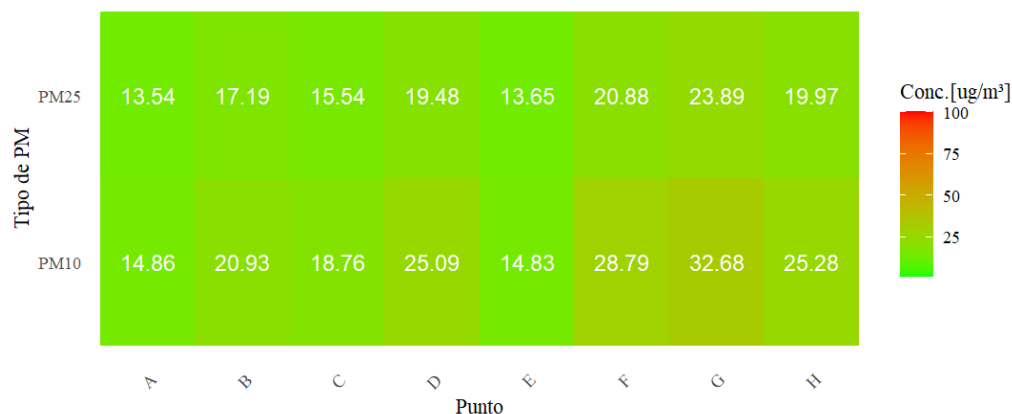


Gráfico 35. Mapa de calor puntos de muestreo (jornada de tarde)

Fuente: Elaboración propia.

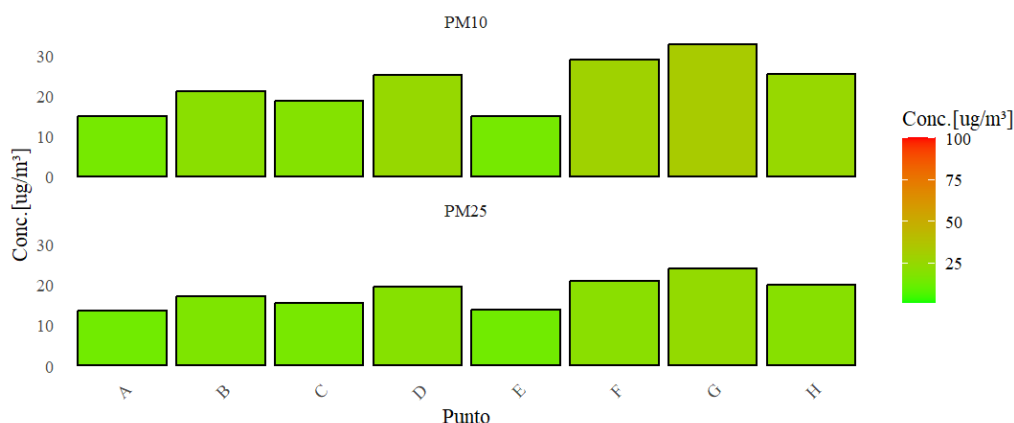


Gráfico 36. Diagrama de barras puntos de muestreo (jornada de tarde)

Fuente: Elaboración propia.

Al analizar los gráficos correspondientes a la jornada de la tarde, se observa que el punto G registra las concentraciones promedio más elevadas para ambos contaminantes, se evidencian valores de $32.68 \mu g/m^3$ para PM_{10} y $23.89 \mu g/m^3$ para $PM_{2.5}$. En contra parte, los puntos A y E presentan las concentraciones más bajas en esta franja horaria.

Al complementar estos resultados con lo observado en la mañana, se resalta que el punto B reporta las mayores concentraciones en esa jornada. Tanto el punto B como el punto G se localizan en la misma calle, la cual está caracterizada por un alto flujo vehicular, indicando que las fuentes móviles constituyen un factor determinante en los niveles registrados. Es importante destacar que la variación espacial de PM_{10} es considerablemente más pronunciada que la observada para $PM_{2.5}$, apartado que se evidencia para ambas jornadas.

7.4.2. Determinación para día compuesto

La distribución obtenida para los puntos de muestreo en el día compuesto se presenta en el mapa de calor (Gráfico 37) y el diagrama de barras comparativo (Gráfico 38) a continuación:

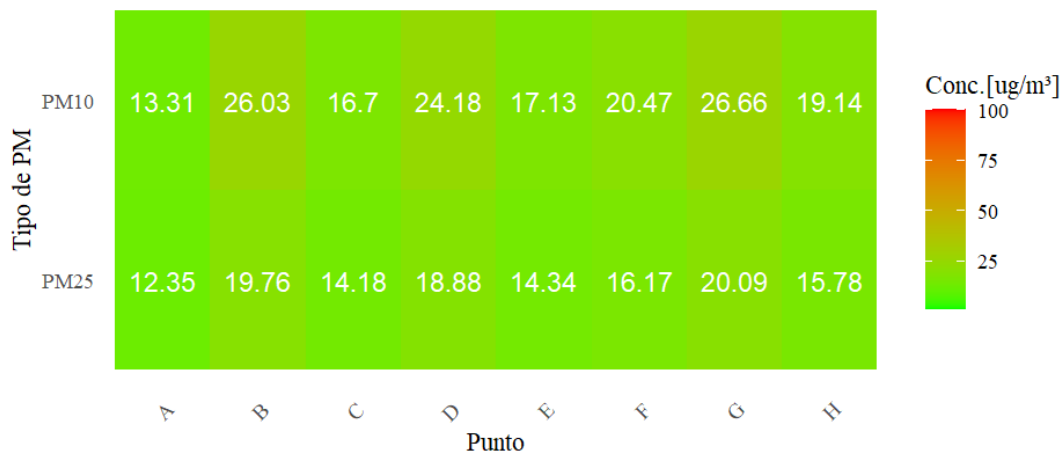


Gráfico 37. Mapa de calor puntos de muestreo (día compuesto)

Fuente: Elaboración propia.

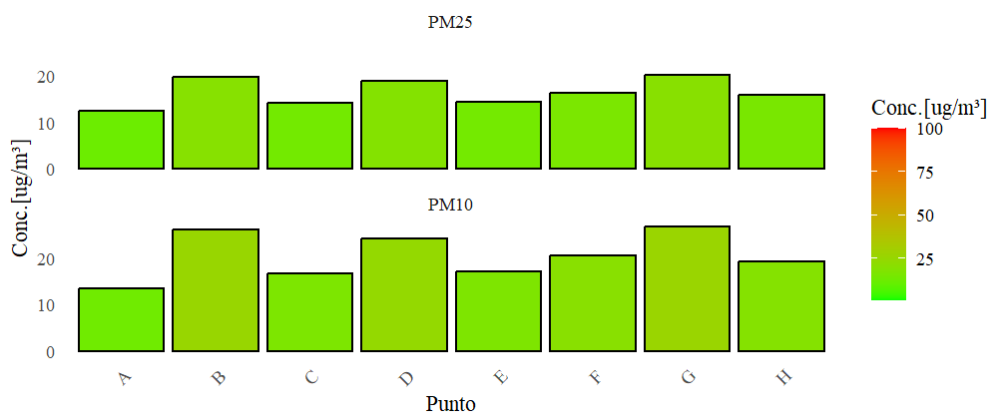


Gráfico 38. Diagrama de barras puntos de muestreo (día compuesto)

Fuente: Elaboración propia.

Para el día compuesto, el punto G registra concentraciones promedio más altas para ambos contaminantes, alcanzando un valor de 26.66 para PM₁₀ y 20.09 para PM_{2.5}, mientras que los puntos A y C presentan las concentraciones más bajas. Además, el punto B es ligeramente inferior al G, ubicándose como el segundo promedio más elevado. Estos resultados concuerdan y le dan consistencia a los obtenidos en las jornadas, evidenciando que el punto G junto con el B, ubicados en la misma calle, son aquellos con los niveles de contaminación más elevados, posiblemente, debido al tráfico vehicular, el cual actúa como fuente móvil y propicia la generación de estos contaminantes. Como resultado, el punto G es seleccionado como punto crítico del lunes.

A modo de comparación de estos resultados finales, el estudio realizado por Avellaneda Tamayo (2023) en una localización próxima a la zona de estudio de la presente investigación, empleando una metodología similar con sensores fijos, reporto resultados notoriamente más altos, con una concentración promedio para ambos contaminantes que excede las recomendaciones de la OMS de 2023 y la resolución 2254 de 2017 con 45,29 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para el PM_{10} y 27,24 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para el $\text{PM}_{2.5}$. En su estudio, atribuyen este resultado a las condiciones meteorológicas y dos factores cruciales por la configuración habitacional que presenta la zona; la proximidad a una estación de servicio de gasolina como fuente activa de generación y la ubicación frente a una de las vías más concurridas del municipio (Avellaneda Tamayo, 2023).

Como referencia a niveles más similares, Franco Pineda (2020), estudia con mayor profundidad la contaminación por PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$, realizando un análisis y caracterización en el municipio de Manizales, su metodología empleo 5 estaciones de monitoreo distribuidas entre la zona industrial y zonas de tránsito de la localidad para el PM_{10} , y una estación de monitoreo para el $\text{PM}_{2.5}$. El estudio determinó que las mayores concentraciones para el PM_{10} , se dieron bajo la influencia del transporte público (Diesel) y vehículos particulares (gasolina y gas) obteniendo concentraciones medias no superiores a 28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Mientras que el $\text{PM}_{2.5}$ se mantuvo con una concentración media de 12.98 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. No obstante, ninguna de las estaciones para ambos contaminantes superó el límite establecido por la resolución 2254 de 2017 (Franco Pineda, 2020).

Al comparar con los valores de Franco Pineda, se evidencia un rango similar para el PM_{10} , pero más elevadas al compararse con los obtenidos para el $\text{PM}_{2.5}$, este resultado implica la posibilidad de un mayor aporte del parque automotor, dada su cualidad para generar reacciones de combustión en la atmósfera resultando en PM de menor tamaño (partículas finas), implicando entonces una mayor concentración de estas evidenciando los resultados obtenidos. Al tomar como referencia el gráfico 28 (correlación entre $\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10}) se puede contrastar nuevamente la relación lineal y positiva entre ambos contaminantes, lo cual puede reforzar la idea del aporte significativo por el parque automotor a razón de la combustión (partículas finas) y resuspensión (partículas gruesas), dinámica comúnmente evidenciada en los vehículos.

De manera correspondiente, es posible vincular estos picos de contaminación a momentos y espacios específicos, identificando así un mayor causante en las emisiones generadas por el parque automotor. Según un estudio realizado sobre la estimación de contaminantes atmosféricos en el área urbana de Envigado, los automotrices, buses y camiones representan el 78.5% de las emisiones del parque automotor, siendo estos los principales causantes de estos picos en horarios de la mañana y tarde, coincidiendo con los horarios laborales generalmente empleados en el país. Estos hallazgos concuerdan con los observados para este trabajo, en la zona centro comercial de Jamundí, donde el tránsito de vehículos particulares y públicos es elevado, sobre todo en el área de estudio dado las múltiples zonas de transbordo, negocios y callejones empleados como rutas vehiculares entre las diferentes áreas del municipio (Londoño et al., 2011).

No obstante, también es posible encontrar referencias que indican resultados diferentes, donde el parque automotor no es el principal causante de la contaminación por material particulado, para esto es necesario revisar estudios realizados en localidades con condiciones similares a las

presentadas en el municipio de Jamundi, permitiendo una mayor compatibilidad en la comparación. Belalcazar & García (2019), realizan un estudio que evalúa la calidad del aire en la cabecera urbana del municipio de Vijes, Cauca. En su trabajo, se determinan las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$, considerando emisiones fijas y móviles, en sus resultados determinan que; el mayor aporte corresponde a la explotación de cal, principal actividad económica de la localidad. No obstante, determinan que el aporte por vehículos es considerable y, aunque de manera reducida, genera un impacto la cabecera municipal, dada la presencia constante de estos en la misma a diferencia de la explotación de cal, para la cual se destinan espacios alejados de la cabecera. Pese a esto, los resultados obtenidos en el estudio indican que, la calidad del aire afectada por la presencia de PM_{10} y $PM_{2.5}$ en el casco urbano del municipio es buena, cumpliendo con las concentraciones indicadas por la resolución 2254 de 2027 (Belalcazar Franco y García Delgado, 2019).

En contraste con los resultados obtenidos, considerando la similitud de los municipios de Vijes y Jamundí, con un desarrollo urbano-rural centralizado y significativo enfrentando desafíos de contaminación por material particulado. En el municipio de Vijes, también se habla de una afectación dado la contaminación por fuentes móviles, no obstante, esta toma un enfoque desde la actividad industrial y determina la explotación de cal como la principal causante del desmejoramiento de la calidad del aire, mientras que Jamundí, aunque con cierto nivel de actividad agro-industrial, cuenta con una preocupación más significativa en el enfoque de contaminación por material particulado debido a las fuentes móviles, en este caso el tráfico vehicular como referente principal.

Morales Betancourt et al (2017), presentan un estudio desarrollado en la ciudad de Bogotá, a partir del cual se evalúan las concentraciones ambientales al $PM_{2.5}$, PM_{10} y al carbono negro (eBC) en diferentes medios de transporte público. En este sentido, el estudio destaca que las mayores concentraciones ambientales fueron registradas en los buses del sistema de buses de tránsito rápido (BRT), mayormente conocido como transporte masivo, alcanzando exposiciones 6 veces más altas que las de peatones y ciclistas y hasta diez veces más que las exposiciones de fondo. Con ello, se muestra que el sistema vial y el tipo de transporte tienen una influencia marcada sobre la exposición, donde las calles de entornos urbanos son las que alcanzan las concentraciones más elevadas. Esto, replica y evidencia los comportamientos observados en Jamundí, donde las zonas con mayor tráfico vehicular concentrado presentaron mayores niveles de contaminación, fundamentalmente en intersecciones. (Betancourt Morales et al, 2017)

En el Ecuador, el estudio realizado por Maldonado & Zambrano (2023), utilizó un equipo portátil con el fin de medir el material particulado en puntos clave de la Institución Educativa Universidad Politécnica Salesiana en Guayaquil, una zona que cuenta con diversas fábricas, empresas de construcción y canteras. El objetivo del estudio fue determinar si la calidad del aire se veía afectada directamente por estos factores. Los resultados indicaron que, pese a la proximidad de las fábricas y áreas de producción, los puntos de mayor contaminación fueron aquellos expuestos directamente al tráfico vehicular, efecto que se vio intensificado por vehículos de gran tamaño, conocidos como vehículos pesados, así como por las cortinas de

polvo generadas por el paso de vehículos sobre calles no pavimentadas (Maldonado y Iglesias Zambrano, 2023).

Objetivamente, los estudios evidencian una tendencia similar bajo las localidades con desarrollos de una connotación similar, relacionando en su mayoría la contaminación del aire por material particulado al parque automotor en efecto directo de sus emisiones e indirecto por factores como el levantamiento de polvo, como se evidencio en el estudio realizado en el Ecuador. Sin embargo, también se observa que las actividades productivas típicas de cada localidad contribuyen a la afectación llegando a ser incluso las principales fuentes. En varios casos, las actividades son mejor reguladas, esto al compararse con la gestión realizada para los automóviles los cuales no control adecuado de emisiones para las localidades, efectuando una mayor contaminación por el uso de estos. En el caso de Viji, se optó por un desarrollo para la explotación de Cal, más alejado de la población, reduciendo de manera considerable la exposición de los habitantes al material particulado y, por ende, sus efectos en la salud.

7.5. Resumen concentraciones determinadas

A continuación, se presenta un resumen de los resultados obtenidos para las concentraciones de PM₁₀ y PM_{2.5}, requeridos para la determinación de la dosis de exposición. En este contexto, se muestran los valores obtenidos correspondientes para jornada de la mañana ubicadas en la tabla 8, jornada de tarde en la tabla 9 y día completo en la tabla 10:

Tabla 8. Resumen concentraciones en jornada de mañana

Día	PM 2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		PM 10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
	Promedio	Máximo	Promedio	Máximo
Lunes	12.24	23.11	13.09	27.30
Miércoles	15.45	23.36	16.98	27.87
Viernes	15.03	22.18	16.03	25.32
Sábado	12.77	21.08	13.36	23.00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9. Resumen concentraciones en jornada de tarde

Día	PM 2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		PM 10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
	Promedio	Máximo	Promedio	Máximo
Lunes	14.78	26.04	16.36	33.35
Miércoles	12.95	22.85	14.09	26.80
Viernes	14.02	23.00	14.91	27.00
Sábado	15.07	25.00	16.36	32.00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10. Resumen concentraciones día completo

Día	PM 2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		PM 10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
	Promedio	Máximo	Promedio	Máximo
Lunes	15.13	29.37	17.50	39.88
Miércoles	13.71	23.86	14.97	28.82
Viernes	14.81	22.96	15.88	26.88
Sábado	13.88	23.94	14.90	29.22

Fuente: Elaboración propia.

Con referencia al día crítico (lunes), se presenta el resumen de las concentraciones para los puntos de muestreo (Tabla 11):

Tabla 11. Resumen concentraciones por punto

Punto	PM 2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM 10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
A	12.35	13.31
B	19.76	26.03
C	14.18	16.70
D	18.88	24.18
E	14.34	17.13
F	16.17	20.47
G	20.09	26.66
H	15.78	19.14

Fuente: Elaboración propia.

7.6. Comparación con informe de calidad del aire CVC

Bajo el enfoque de este trabajo, es importante considerar que, a la hora de realizar una comparación con otros estudios realizados sobre la calidad del aire en orden de la contaminación por material particulado, existen particularidades relacionadas a la metodología, alcance y condiciones presentadas en la localidad, por esta razón, la comparación más directa es posible mediante las mediciones registradas por la CVC en su informe anual de estado de calidad del aire, autores como Peláez et Al. (2020), en su estudio, hacen un refuerzo sobre la falta de políticas para gestión de la calidad del aire, impulsando este tipo de estudios y análisis comparativos a manera de fundamentar estrategias locales con bases de evidencia científica y experiencias regionales ya documentadas. (Gómez Peláez y otros, 2020)

El informe de calidad del aire, realizado para el departamento del Valle del Cauca, el cual está compuesto por varias regiones y sus correspondientes municipios entre los que se encuentra Jamundí. Este documento, obtenido mediante los SVCA, cuenta con el monitoreo de variables meteorológicas y contaminantes criterio del aire, entre los que se encuentra el material particulado (CVC, 2024). En este sentido, es posible comparar los resultados obtenidos en este

trabajo para las mediciones realizadas en los meses de muestreo con los datos registrados por la CVC en su informe anual. Es este, el medio más cercano y concreto para identificar comportamientos y realizar comparaciones sobre los niveles registrados por material particulado, estableciendo así, una relación más adecuada para los resultados obtenidos.

El monitoreo de estas variables para la localidad se realiza en la estación de monitoreo de calidad del aire ubicada en el hospital piloto de Jamundí, con coordenadas 3°15'26"N/ 76°32'39"W. Esta estación de tipo automático tiene como referencia los niveles establecidos por la resolución 2254 de 2017.

Respecto a los registros del Informe de Calidad del Aire de la CVC, se encuentran datos publicados de esta estación hasta el año 2023, correspondientes al “Informe de Calidad del Aire para 2022”. Por esta razón, buscando comparar con los datos más recientes (2024), se recurre al sistema de información SISAIRE, el cual cuenta con los datos de variables meteorológicas y calidad del aire suministrados por las SVCA administrados por las autoridades ambientales (IDEAM, 2025).

En este contexto, aunque es posible efectuar comparación entre los resultados obtenidos para Cali (ciudad vecina a la localidad) y Cascajal (municipio ubicado entre el área rural de Cali y Jamundí) con la información registrada en el informe de calidad del aire, bajo el marco de los objetivos de esta investigación, se adopta la comparación con los datos registrados para el valor promedio de concentración anual PM_{10} Y $PM_{2.5}$ en el Informe de Calidad de Aire para el 2022 y SISAIRE para el 2024. A continuación, se presenta una tabla resumen con los valores resultantes para PM_{10} Y $PM_{2.5}$ para las fuentes:

Tabla 12. Concentraciones de PM según fuentes de información

Estadístico concentraciones ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM_{10}	$PM_{2.5}$
Promedio - 2024	40.0	14.3
Promedio - 2022	33.7	12.1
Máximo - 2022	85.8	69.1
Percentil 25 - 2022	24.2	8.7
Percentil 75 - 2022	41.7	14

Fuente: Tomado de SISAIRE 2025 (IDEAM, 2025); Informe de Calidad del Aire 2022 (CVC, 2022)

De los valores identificados, no se presenta excedencia respecto a la resolución 2254 de 2017 para ninguno de los años. No obstante, el año 2024 presenta valores más altos para ambos contaminantes, factor que puede atribuirse en un crecimiento poblacional acelerado, evidenciado los últimos años, que ha traído consigo un aumento en la utilización de vehículos. Respecto al informe del 2022, en los valores de percentil 25 y 75, los cuales corresponden al 50% de los valores registrados se encuentra una mayor similitud con los registros del 2024, sin embargo, estos valores siguen sin exceder los límites de referencia de la resolución y se mantienen a bajo las recomendaciones de la OMS.

Son los valores promedios los que se toman como referencia para comparar a los resultados obtenidos en la investigación. Por su parte, la excedencia presentada en su nivel máximo podría corresponder a eventos atípicos, y aunque genera cierta incidencia y podría compararse con los valores máximos obtenidos en este trabajo, no representa una normalidad característica como lo hacen las otras estadísticas y no es posible determinar con la información suministrada en el documento, si el método empleado para determinar los valores máximos excluye valores atípicos como se realizó en este trabajo.

A continuación, se presenta una pequeña tabla comparativa para los valores promedio de las concentraciones de PM₁₀ Y PM_{2.5} a manera de registro de información para los valores identificados:

Tabla 13. Comparativa de PM con fuentes de información

Contaminante	Concentraciones $\mu\text{g}/\text{m}^3$			
	Promedio SISAIRE IDEAM 2024	Promedio Informe CVC - 2022	Promedio día crítico (lunes)	Promedio punto crítico (G)
PM 10	40.0	33.70	17.50	26.66
PM 2.5	14.3	12.10	15.13	20.09

Fuente: Elaboración propia.

De manera general, considerando una equivalencia en el comportamiento presentado para el año 2022 y los registros del 2024, es posible evidenciar una similitud en los valores correspondientes al PM_{2.5} (partículas finas), alcanzando un promedio superior para las mediciones de día crítico que pueden relacionarse a factores meteorológicos o directos a la zona de muestreo, la cual cuenta con un mayor tránsito vehicular y zonas sin pavimentar con gran cantidad de polvo.

Por otro lado, el PM₁₀ (partículas gruesas) cuenta con una mayor diferencia respecto a los promedios registrados por el informe de la CVC y del IDEAM respectivamente, este valor implica una mayor cantidad de partículas de mayor tamaño, quizá mismo producto del alto tráfico vehicular o factores meteorológicos como la humedad, que permite la concentración de estas partículas, el periodo de muestreo (donde se pudieron presentar cambios significativos en los niveles) y las fuentes de emisión, las cuales moldean la naturaleza de los contaminantes dispersos al aire.

Es posible decir que, en el promedio anual se observa un incremento en las partículas gruesas (PM₁₀), mientras que las concentraciones de partículas finas (PM_{2.5}), aunque con una posible mayor variabilidad, se presentan sobre niveles similares a los registrados en el reporte, manteniéndose sobre un ICA categoría “bueno” o “aceptable”. Esto a su vez, da lugar a indicar que existe una mayor sensibilidad por material particulado fino en las zonas identificadas, aspecto que debe de considerarse para la formulación de estrategias y atención a la salud de los locales.

7.7. Analisis de encuestas y determinación de la percepción de la calidad del aire

La percepción de la calidad del aire para la población se determinó a través de encuestas. El tamaño de muestra ideal determinado mediante el cálculo de tamaño de muestra presente en la metodología era de 106 encuestas, de las cuales se realizaron 87, lo cual, aunque no es el numero

esperado, representa una proporción significativa y permite obtener resultados adecuados. Adicionalmente, la aplicación de las encuestas se concentró sobre la última semana de medición, permitiendo así informar a los encuestados con posibles resultados previos obtenidos de las mediciones de la calidad del aire hasta el momento. Como consecuencia de estos puntos, no se alcanzó el número de encuestados previsto en el tamaño de muestra calculado. De esta manera, el número de encuestas (86%) corresponden a un margen de error de 8.8%, en consideración a las variables y el método de cálculo empleado para la estimación del tamaño de muestra (número de encuestas).

Las encuestas fueron realizadas sin un criterio de selección específico. Se recurrió a la disponibilidad de las personas presentes en el área de estudio durante las jornadas de muestreo así como a personas conocidas que frecuentaban la zona del centro comercial de Jamundí, que corresponde al punto focal del área de muestreo.

7.7.1. *Variables sociodemográficas*

Los resultados de las encuestas relacionados a las características sociodemográficas se presentan mediante gráficos de anillos/donuts de la siguiente manera: Edad (Gráfico 39), sexo (Gráfico 40), estrato socioeconómico (Gráfico 41) y nivel de estudios (Gráfico 42).

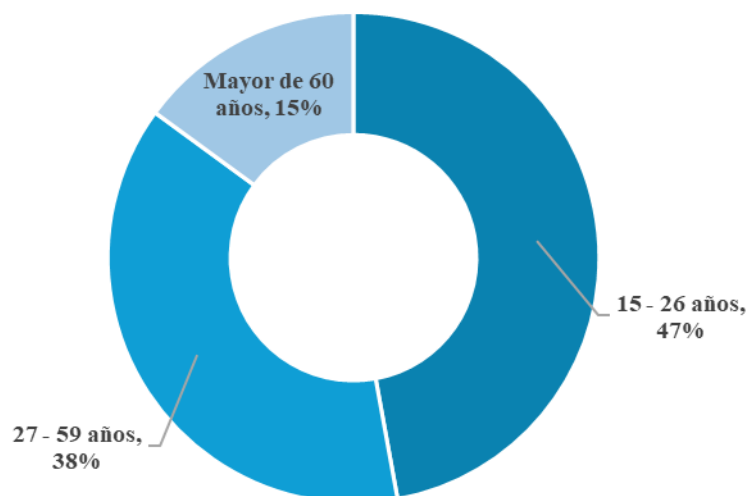


Gráfico 39. Edad de los encuestados

Fuente: Elaboración propia.

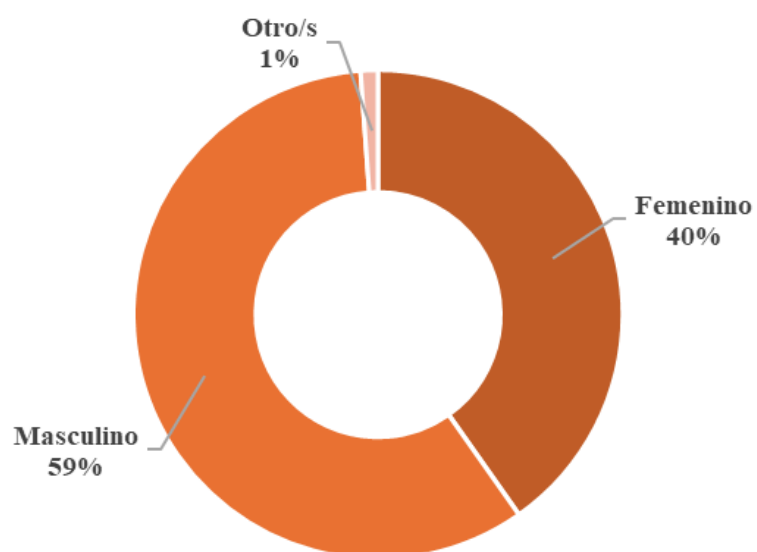


Gráfico 40. Genero de los encuestados

Fuente: Elaboración propia.

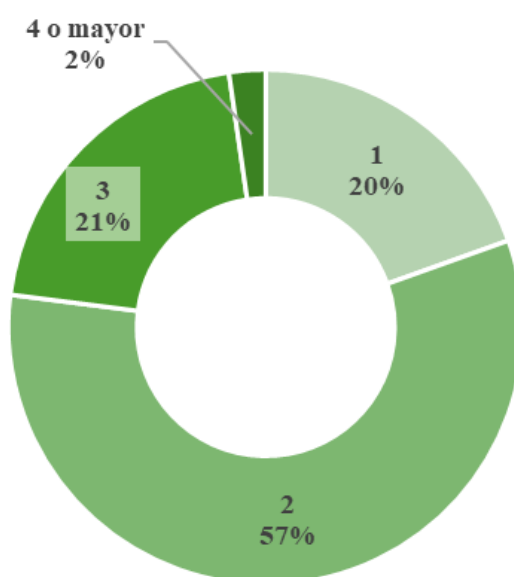


Gráfico 41. Estrato de los encuestado

Fuente: Elaboración propia.

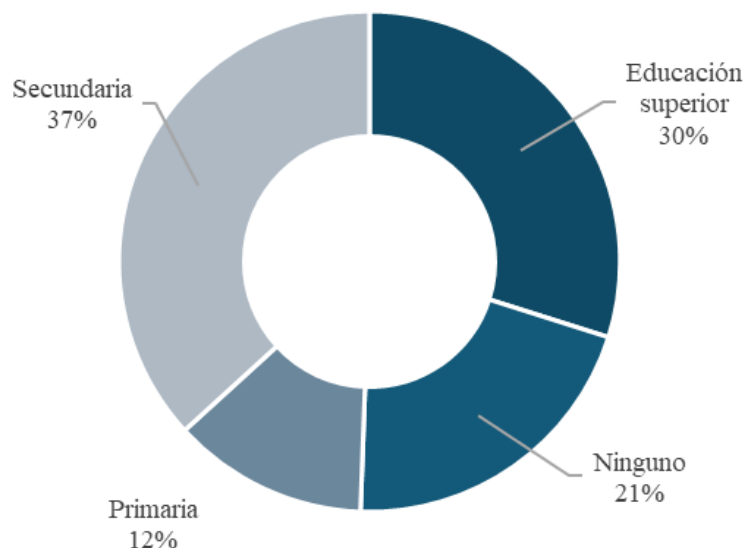


Gráfico 42. Nivel de educación de los encuestados

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados del apartado sociodemográfico de la encuesta indican una variabilidad notable en la composición de los encuestados, resultado que puede fundamentarse en las características de la zona de estudio. Se observa que la mayoría de las participantes son hombres, predomina un rango de edad entre los 15 a 26 años. Además, la mayoría pertenece a un estrato socioeconómico nivel 2 y ha completado como máximo la educación secundaria. La diversidad observada en los resultados ofrece una visión más completa y amplia sobre las distintas percepciones que se pueden tener respecto a la calidad del aire. Con estos resultados, es posible decir que la percepción obtenida corresponde mayormente a la de jóvenes, población con una exposición cotidiana a una posible contaminación del aire por material particulado, lo que podría resultar en posibles problemas respiratorios, reducción de capacidad pulmonar o en el aumento de enfermedades relacionadas como el asma, entre otros, considerando que esta exposición eventualmente tendrá efectos sobre esta población representativa. Además, por las características socioeconómicas también es posible decir que estas poblaciones cuentan con un menor acceso a los servicios de salud y educación de alta calidad, factores que de manera colateral pueden influir respectivamente en cómo se manejan las posibles afecciones a la salud y el conocimiento de las condiciones ambientales que se presentan.

Adicionalmente, los resultados de la caracterización demográfica dentro del estudio se pueden ver favorecidos y enfocados en la población más joven, ya que estos representan un sector activo de la comunidad, con una movilidad frecuente por la ciudad y una mayor interacción con fuentes de contaminación, como el tráfico y la actividad comercial. Esta percepción podría ayudar en la identificación de los patrones de exposición y generar conciencia sobre los efectos de la contaminación a una edad más temprana y activa, reforzando así la conciencia y participación frente a las situaciones relacionadas con la calidad del aire en Jamundí.

7.7.2. Resultados del formulario de evaluación

Los resultados de las encuestas sobre la percepción de calidad del aire se encuentran organizadas de acuerdo con las preguntas del formulario, los gráficos identifican cada pregunta mediante el título que les corresponde. A continuación, se presentan estos resultados:

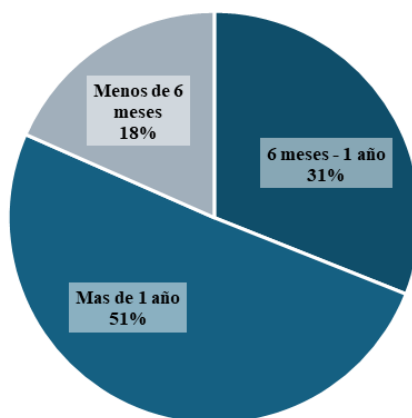


Gráfico 43. Tiempo de residencia en Jamundí

Fuente: Elaboración propia.

El grafico evidencia que la mayoría de los participantes cuentan con un periodo de residencia en Jamundí superior a un año, lo que sugiere que su percepción de la calidad de aire en la localidad puede ser más realista y extensa, debido a una mayor experiencia y convivencia con las condiciones ambientales que se presentan. Además, esta longevidad permite reconocer los posibles cambios o eventos que hayan afectado la calidad del aire.

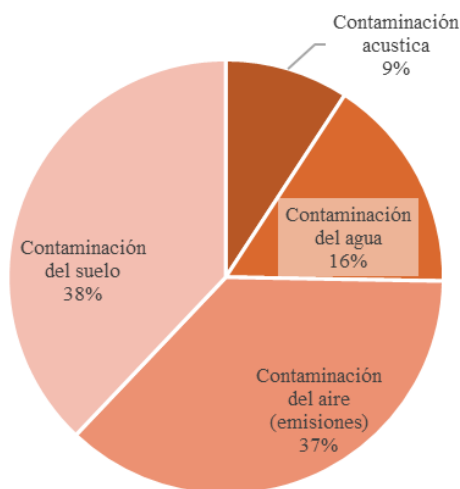


Gráfico 44. Problemática ambiental significativa

Fuente: Elaboración propia.

El grafico muestra que la comunidad percibe la contaminación del suelo y del aire como las principales problemáticas ambientales (entre las opciones disponibles en la encuesta), esto podría relacionarse a deficiencias en las condiciones del centro de Jamundí, donde, en muchas

ocasiones se evidencia acumulación de residuos y una alta presencia de polución por el tráfico y congestión vehicular (fuente reconocida de emisiones de material particulado y gases propios de la combustión), factor que además tuvo su retroalimentación (información brindada sobre la contaminación del aire, sus causas y efectos) durante la encuesta, influenciando a los participantes sobre este tipo de contaminación.

Del apartado, destaca el hecho de que el 37% de los encuestados identifican la contaminación del aire como principal problemática, reforzando la relevancia del estudio y evidenciando una preocupación por la calidad del aire por parte de la comunidad. Además, coincidiendo con los hallazgos previamente mencionados, que vinculan el alto tráfico vehicular con la degradación de la calidad del aire, esto en conjunto con aspectos observados como vehículos con grandes emisiones, puestos ambulantes donde se genera humo, altas cantidades de polvo en las calles, entre otros, dando lugar finalmente a esta posible percepción sobre las emisiones y su papel en la contaminación del aire.

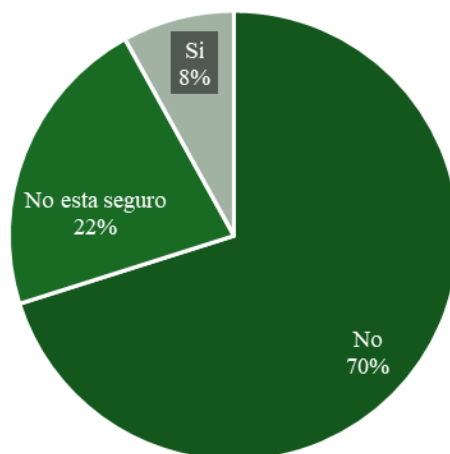


Gráfico 45. Conocimiento sobre contaminación del aire y sus efectos en la salud

Fuente: Elaboración propia.

El gráfico muestra una mayoría de participantes con un conocimiento nulo o limitado sobre que es la calidad del aire y cuáles son sus efectos en la salud y medio ambiente. El 70% de los encuestados indica no tener un conocimiento al respecto, mientras con un 22% no está seguro, dejando un total de 92% de encuestados con una falta de información al respecto. Este apartado evidencia además la necesidad de reforzar las estrategias de comunicación y concientización sobre la contaminación del aire, incentivando una participación frente a esta problemática que posee tantos efectos sobre la salud.

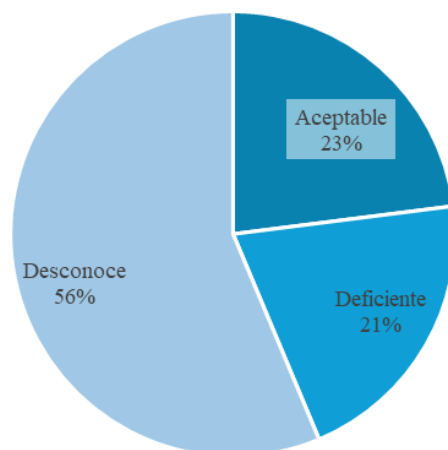


Gráfico 46. Calificación calidad del aire

Fuente: Elaboración propia.

El gráfico presenta concordancia con los resultados previos. Como respuesta a la pregunta, el 56% de encuestados indican un desconocimiento sobre la calidad del aire, relacionado a no saber cómo evaluarla, esto sugiere una falta de información en los criterios que determinan si el aire que se respira es de buena o mala calidad. No obstante, también se encuentra una división entre la percepción de calidad del aire como “aceptable” con 23% y “deficiente” con 21% de los encuestados. Adicionalmente, no se registraron respuestas correspondientes a una percepción de calidad del aire “excelente”. Estos resultados sugieren un desconocimiento general de la calidad del aire, que no se ve favorecida por las condiciones ambientales de la localidad.

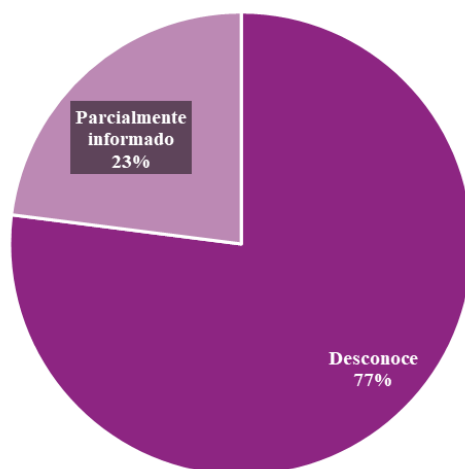


Gráfico 47. Nivel de conocimiento sobre calidad del aire local.

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto al conocimiento sobre la calidad del aire que se respira en la localidad, se observa mediante el grafico un alto grado de desconocimiento, con un 77% de los encuestados que desconocen la calidad del aire que se respira, reforzando los hallazgos de los resultados previos. En contraparte, el 23% afirma estar parcialmente informado, principalmente de redes sociales, noticias en sitios webs o reputación del municipio, conocida por una abundante presencia de zonas verdes. Es destacable que ningún encuestado selecciono las opciones “Está al tanto” o “Bien informado”, evidenciando una falta de comunicación por medios que refuercen el conocimiento y estado de la calidad del aire en la localidad. Sumado a los resultados anteriores, esto sugiere una percepción de lejanía o incertidumbre frente al tema.

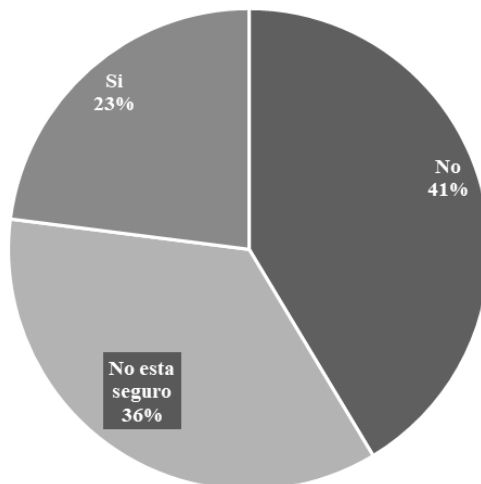


Gráfico 48. Efectos en la salud por la mala calidad del aire

Fuente: Elaboración propia.

Frente a la pregunta sobre la presencia de efectos en la salud por influencia de una mala calidad del aire, se observa una distribución que tiende a no evidenciar afectaciones directas. El grafico evidencia que el 41% de los encuestados respondió “No”, mientras que un 36% “No está seguro”, estos resultados sugieren una posible falta de conocimiento sobre la relación entre la calidad del aire y la salud. No obstante, el 23% respondió “Sí”, afirmando experimentar impactos a la salud. Este resultado se puede asociar a síntomas como alergias, irritación de ojos y nariz, entre otros que pueden relacionarse a la exposición de contaminantes atmosféricos presentes en una mala calidad del aire, apartado que se encuentra bajo conocimiento de estos individuos, permitiéndoles dar esta respuesta.

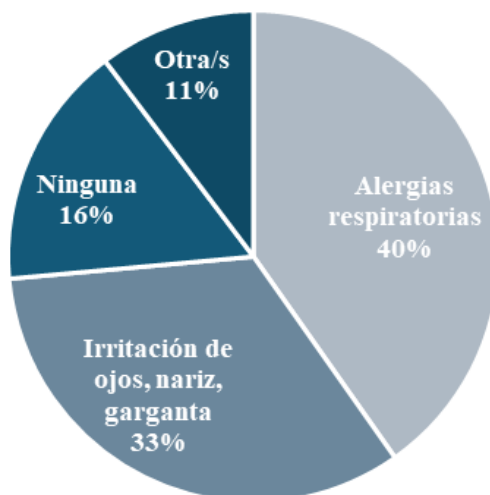


Gráfico 49. Enfermedades presentadas asociadas a la mala calidad del aire

Fuente: Elaboración propia.

El gráfico muestra que la mayoría de encuestados han experimentado enfermedades o síntomas asociados a una mala calidad del aire, destacando las alergias respiratorias con un 40% de registros y la irritación en ojos, nariz y garganta con un 33%. Esto sugiere una exposición recurrente a contaminantes que podrían afectar las condiciones de salud de la población. No obstante, un 16% indicó no haber presentado ninguna de las afecciones registradas en la encuesta con relación a la calidad del aire, lo que podría reflejar una percepción poco clara entre la relación de calidad de aire y la salud. De manera general, se evidencia que la mayoría de los encuestados han experimentado algún impacto en su bienestar que puede vincularse a la contaminación del aire.

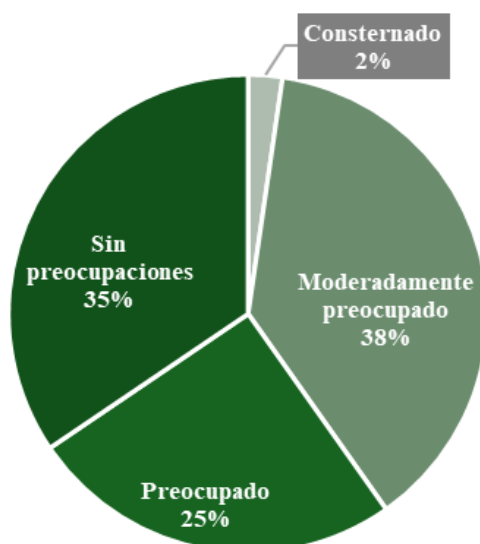


Gráfico 50. Preocupación frente a la calidad del aire

Fuente: Elaboración propia.

El grafico evidencia una preocupación frente a la calidad del aire con una distribución variada entre los encuestados. Un 35% manifiesta no estar preocupado, mientras que un 28% se considera moderadamente preocupado y un 25% preocupado. Es de destacar que un 2% se identifica como consternado. Estos resultados son reflejo de una preocupación influenciada por los factores previamente analizados y discutidos en la encuesta, evidenciando que una parte de la población no percibe la gravedad del problema mientras que otro sector significativo cuenta con inquietudes sobre la calidad del aire en la localidad.

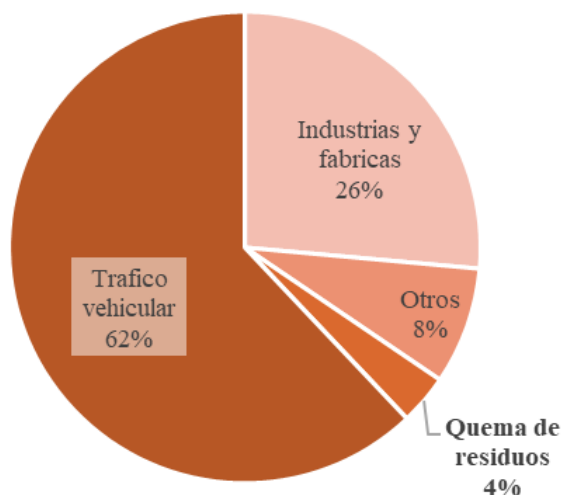


Gráfico 51. Factores que contribuyen a la contaminación del aire

Fuente: Elaboración propia.

Es posible evidenciar que, el tráfico vehicular es identificado como el principal factor contribuyente a la contaminación del aire, según el 62% por los encuestados, seguido por las industrias y fabricas con un 26%. Este resultado refleja la alta presencia de vehículos en la localidad, los cuales, en muchas ocasiones dejan un rastro contaminante debido a la falta de implementos adecuados para reducir las emisiones. Esto indica que la percepción de la comunidad se vincula a las fuentes de emisión más visibles y cotidianas en la zona. Además, resalta la necesidad de implementar estrategias para mejorar la calidad del aire, regulando los vehículos contaminantes y actividades que afectan la calidad del aire.

En este punto, se evidencio la dificultad de la comunidad por establecer la relación directa entre la calidad del aire y las fuentes generadoras, no obstante, resalta la facilidad con la que se involucra el tráfico vehicular como uno de los principales causantes. Según el estudio realizado en Bogotá, el 80% de la población percibe una mala calidad del aire y más del 50% identifico el transporte como la principal fuente de contaminación. La justificación general de los encuestados está en que lo relacionaban con lo que pueden evidenciar y observar, es decir, el humo y congestión. Además, los encuestados les atribuyen esta identificación a las fuentes de

información masiva como periódicos, noticieros y otros, que la identificaban como una de las problemáticas claves de la localidad (Ariza et al, 2019).

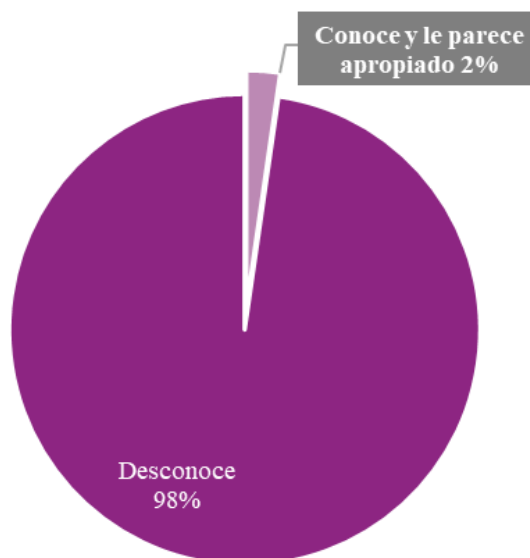


Gráfico 52. Conocimiento sobre medidas locales para mejorar la calidad del aire

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, la distribución de la gráfica indica un desconocimiento casi total de las estrategias empleadas en la localidad para evitar, mitigar o reducir la calidad del aire, con un 98% de votos para la categoría “Desconoce”. Este apartado, sumado a las respuestas anteriores resalta la falta de conocimiento de la población frente a la calidad del aire en la localidad, como también de la necesidad de implementar campañas para favorecer este apartado. Adicionalmente, destaca que no se registraron respuestas para la opción “Conoce las medidas y le no le parecen indicadas”, reforzando este último apartado.

En este sentido, los resultados obtenidos reflejan que no solo existe un bajo nivel de conocimiento de la comunidad, sino también, un desentendimiento de las posibles acciones o estrategias que se adoptan en la localidad por la secretaria de ambiente, donde se indican programas de control a las emisiones contaminantes del aire, provenientes tanto de fuentes fijas como móviles (Alcaldía Municipal de Jamundí, 2025). La comunidad entonces no parece estar involucrada o al tanto de temáticas ambientales, limitando cualquier posibilidad de involucrarlos de manera activa para la formulación de estrategias como lo pueden ser, la gestión de emisiones en el municipio. No obstante, esto puede verse como una oportunidad de mejora e intervención desde la educación ambiental, con campañas claras y frecuentes que ayuden a mejorar la percepción de la población respecto a sus condiciones ambientales, generando una mayor conciencia colectiva, lo que propicia su involucración para la formulación y realización de estrategias. En este mismo sentido, también representa una oportunidad para fortalecer la comunicación y difusión de las estrategias y planeación del municipio bajo un enfoque medio ambiental, clave para un correcto desarrollo poblacional como el que se presenta para el municipio.

7.8. Determinación de la exposición al material particulado

La exposición de los habitantes a los contaminantes PM_{10} y $PM_{2.5}$ se determinó a partir de la ecuación 4, utilizando las concentraciones obtenidas en los diferentes escenarios, presentando así resultados para mañana y tarde (Tabla 8 y 9), día completo (Tabla 10) y los puntos de muestreo para el día crítico (Tabla 11).

Para la dosis de ingesta, se tomó como referencia la tabla 5, donde se identifican las dosis de ingesta recomendadas según la edad e intensidad del nivel de actividad. Según los resultados de la encuesta, el grupo más representativo corresponde a un rango de edad entre los 15 a 26 años, obteniendo una tasa de inhalación (equivalente a la tasa de ingesta empleada en la ecuación 4) de $2.06E-02 \text{ m}^3/\text{min}$ ($0.0206 \text{ m}^3/\text{min}$) al promediar los valores de la tabla por proximidad a los grupos.

Por su parte, la determinación del tiempo de exposición (TE), sigue dos enfoques. Para los visitantes, según la tabla 5, el grupo de 15 a 26 años, como grupo representativo, se ajusta a los valores dentro de la categoría desde 18 a 56 años realizando una interpolación de valores, como resultado, el tiempo de exposición aproximado es de 232 minutos (aproximadamente 4 horas) por día (EPA, 2011). Para los habitantes o personas con permanencia continua en la zona, se asume un periodo completo de exposición de 24 horas (1440 minutos), utilizando este valor como referencia temporal para el cálculo de la exposición. Sin embargo, es importante considerar que esta aproximación mantiene constante la tasa de inhalación durante todo el día, sin tener en cuenta que las actividades físicas de las personas pueden variar significativamente a lo largo de las 24 horas, al igual que las emisiones de contaminantes, las cuales pueden disminuir en ciertos horarios. Esta simplificación, aunque común en estudios de calidad del aire, implica que las fluctuaciones reales de la exposición diaria pueden estar subestimadas o sobredimensionadas en determinados periodos, por lo que la exposición para habitantes representa un escenario crítico o de asunción extrema.

La exposición, expresada en $\mu\text{g}/\text{día}$, representa la dosis potencial de inhalación a la que un estar individuo podría estar expuesto, sea como visitante (tiempo de exposición de 232 minutos) o como habitante/permanencia continua (tiempo de exposición de 1440 minutos). A continuación, se presentan las dosis de inhalación para PM_{10} y $PM_{2.5}$ por jornadas (Tabla 14) y día completo (Tabla 15).

Tabla 14. Dosis potencial jornadas

Jornada Mañana				
Día	PM 2.5		PM 10 (µg/día)	
	Visitante	Habitante	Visitante	Habitante
Lunes	75.40	468.01	85.28	529.34
Miércoles	90.39	561.01	98.43	610.92
Viernes	90.67	562.76	96.69	600.14
Sábado	76.80	476.67	80.34	498.65
Jornada Tarde				
Día	PM 2.5 (µg/día)		PM 10 (µg/día)	
	Visitante	Habitante	Visitante	Habitante
Lunes	87.21	541.28	95.77	594.44
Miércoles	78.56	487.60	85.47	530.52
Viernes	85.04	527.84	90.49	561.64
Sábado	91.06	565.23	98.92	613.97

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 15. Dosis potencial día completo

Día	PM 2.5 (µg/día)		PM 10 (µg/día)	
	Visitante	Habitante	Visitante	Habitante
Lunes	91.26	566.45	105.55	655.14
Miércoles	82.70	513.30	90.32	560.62
Viernes	89.35	554.58	95.76	594.37
Sábado	83.74	519.75	89.86	557.74

Fuente: Elaboración propia.

Tomando como referencia los resultados para días completos, el lunes cuenta con las dosis potenciales más elevadas. Para los visitantes, se alcanza una dosis potencial de 91.26 µg/día para PM_{2.5} y 105.55 µg/día para PM₁₀. Mientras que, para los habitantes o personas de permanencia continua de la zona, la exposición aumenta considerablemente, alcanzando una dosis potencial de 566.45 µg/día para PM_{2.5} y 655.14 µg/día para PM₁₀. Referente al día crítico, en la Tabla 16 se presentan los valores correspondientes a la dosis potencial por punto de muestreo:

Tabla 16. Dosis potencial puntos de muestreo

Punto	PM 2.5 ($\mu\text{g}/\text{día}$)		PM 10 ($\mu\text{g}/\text{día}$)	
	Visitante	Habitante	Visitante	Habitante
A	74.50	462.41	80.29	498.35
B	119.18	739.73	157.03	974.69
C	85.54	530.96	100.71	625.10
D	113.87	706.75	145.87	905.38
E	86.52	537.00	103.34	641.42
F	97.53	605.38	123.49	766.47
G	121.16	752.02	160.82	998.18
H	95.18	590.79	115.48	716.74

Fuente: Elaboración propia.

Para los puntos de muestreo, donde G presenta las dosis más altas, se evidencia una exposición para visitantes a $121.16 \mu\text{g}/\text{día}$ para $\text{PM}_{2.5}$ y $160.82 \mu\text{g}/\text{día}$ para PM_{10} . Mientras que, para los habitantes o personas de permanencia continua en la zona, la exposición aumenta a $752.02 \mu\text{g}/\text{día}$ para $\text{PM}_{2.5}$ y $998.18 \mu\text{g}/\text{día}$ para PM_{10} , alcanzando así los valores más altos en los registros. Es importante destacar que el punto G, al igual que el punto B se encuentran en un callejón comercial con tráfico vehicular, incluyendo vehículos pesados como autobuses y volquetas. Esto limita el número de personas en la zona, pero aún mantiene una presencia constante en la ubicación. Además, en contraste con estos puntos, como se presentó en el apartado de determinación para día compuesto, las zonas de muestreo generalmente en una serie de callejones, tienen tramos como A-H y B-G con alto paso de vehículos de transporte público (autobuses), como también el tramo D-E, con zonas para transbordo de estos vehículos, factores que influyen en los niveles de contaminación, lo que se puede observar en los resultados obtenidos para la dosis potencial, directamente relacionada a las concentraciones registradas para cada punto y correspondientemente al día crítico.

El estudio realizado por Morales Betancourt et al. (2017), realizado para microambientes de transporte en Bogotá, en donde se encontró que, aunque las concentraciones medias de $\text{PM}_{2.5}$ fueron mucho más altas en el interior de los buses del sistema de transporte masivo y en vehículos particulares con lecturas de hasta $186 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Son los peatones circulando en la acera, aquellos que inhalaron las dosis más altas por trayecto completo, determinando una dosis potencial de hasta $126 \mu\text{g}$. Esto se debe a la determinación de la dosis, la cual depende de concentración, tiempo de exposición y tasa de inhalación, siendo estas dos últimas mucho mayores para los peatones. Además, se estima que, para trayectos más largos, los peatones toman entre 60 a 70 min por trayecto, con una mayor tasa de respiración debido a la actividad física, resultando en una dosis mayor que en caso de ser constante puede resultar riesgo prominente para los habitantes. En su estudio, también resaltan la configuración de las calles dado a ciertos puntos tipo “cañón” con dosis que se duplicaban, identificadas como zonas de calles urbanas flanqueadas por edificios altos y continuos por ambos, normalmente ubicadas en callejones comerciales los cuales son más cerrados y con mayor tráfico, aspecto similar a lo evidenciado en el estudio para Jamundí. Estas zonas generan un atrapamiento de los

contaminantes. Al contrastar estos resultados con los obtenidos en este estudio, es posible afirmar que los peatones (visitantes y residentes) son un grupo de elevado riesgo dados los factores de exposición (tasa de inhalación y tiempo de exposición) frente a la contaminación por material particulado.

Según los resultados obtenidos, también es posible afirmar que el tráfico es un factor determinante y clave en la contaminación del aire, en este caso por material particulado, en la zona urbana de Jamundí. Aunque datan registros de contaminación de PM por la quema de cultivos como la caña, contando con una alta presencia en los alrededores del municipio y cercanías de la zona urbana. La contaminación por esta quema no impacta con notoriedad la zona urbana en comparación. Como referencia, la CVC registro en el año 2020, un alza en los niveles de contaminación del aire debido a factores como el incremento de flujo vehicular tanto de maquinaria pesada como de congestión vehicular por el plan retorno de las vacaciones de fin de año (CVC, 2020).

La relación entre tráfico y calidad del aire depende además de una variabilidad espacial, la cual puede tener diferencias en relación directa con la dinámica de movilidad presente en la ciudad. Estudios realizados para la ciudad de Cali demuestran que el pico de contaminación se alcanza sobre las 6 de la tarde, hora sobre la cual se presenta el plan retorno debido al transporte de vuelta a casa de gran parte de la población, resaltando este impacto sobre el municipio de Jamundí el cual funciona como ciudad dormitorio de Cali y sus alrededores (Ghisliane et al., 2023).

A nivel local, Imery (2022), estudia la exposición de los biciusuarios al sur de Cali a contaminación por material particulado, determinando que los niveles se encuentran por encima de las recomendaciones de la ONU, tomando como referencia mediciones puntuales entre las 6 y 8 AM, identificando un aumento gradual en las concentraciones para la mayoría de los casos a medida que avanza el día. Dado que no es zona industrial, el estudio atribuye como causa principal las emisiones vehiculares sumadas a una baja dispersión atmosférica en conjunto con las transformaciones fisicoquímicas que dan lugar en la atmósfera. Además, mediante la elaboración de mapas de calor, identifican que las dosis más altas se presentan en intersecciones viales, atribuyendo de manera considerable una atribución por el arranque y aceleración de los vehículos, momento en donde se generan las reacciones cuyo producto son gases emitidos a la atmósfera como contaminantes (Imery Almario, 2022).

El estudio, realizado sobre las ciclovías del sur de Cali, identifica de igual manera para una ciudad con un alto tránsito vehicular, dado en su mayoría por el transporte rutinario a las jornadas de trabajo en dirección a las cercanías centro o norte de la ciudad, niveles altos a medida que se avanza el día y sobre las intersecciones con tráfico vehicular, efecto que también se pudo observar para este trabajo donde los niveles de contaminación corresponden a los puntos con intersecciones con mayor tránsito, reforzando así los resultados obtenidos y el fundamento busca justificar los altos niveles registrados para estos puntos. De igual manera, evidencia que las mayores concentraciones se obtienen en la mañana (Porrás Castro, 2023).

A nivel regional, Gómez Peláez et al. (2020), hace una revisión de la evolución de la calidad del aire en ciudades metropolitanas de América Latina durante el periodo de 2010 a 2017. El análisis abarca entre sus contaminantes clave el PM_{10} y $PM_{2.5}$, determinando tendencias de concentración, cumplimiento a estándares y posibles impactos a la salud. Entre las ciudades revisadas, Bogotá, Quito o Medellín cuentan con contextos comparables, donde con normalidad

se superaban los valores establecidos en las directrices de cada localidad. El estudio infiere en que el problema por material particulado es un aspecto común en localidades como estas, permitiendo relacionar los hallazgos con contextos urbanos como el identificado en Jamundí. No obstante, los resultados obtenidos se consideran en gran margen adecuados, ya que las concentraciones de material particulado rara vez exceden los valores recomendados por las normativas vigentes, incluyendo la resolución 2254 de 2017, posicionando Jamundí en un contexto de calidad del aire satisfactorio en comparación.

No obstante, el estudio señala que, de manera general, la contaminación por PM se relaciona con deficiencias en la planeación de los territorios, cobertura y operación de las redes de monitoreo ambiental y algunas desigualdades socioeconómicas, las que limitan la posibilidad de operación (Gómez Peláez y otros, 2020). Apartado que se evidencio debido a la presencia significativa de vehículos en mal estado o con una notoria emisión de contaminantes (humo), sumado a la deficiencia en el conocimiento y la percepción de la ciudadanía sobre las condiciones de calidad del aire, como también la gestión urbana que presenta limitaciones en la dispersión de los contaminantes como las calles estrechas con alta densidad vehicular en cercanías a la ciudadanía como en calles sin pavimentar, lo que favorece la resuspensión de polvo y aumenta el material en resuspensión.

Bajo el marco de realización de este estudio y las similitudes encontradas con otros autores, se demuestra que los niveles de contaminación por material particulado tienden a ser más elevados en localidades urbanas donde se experimenta un crecimiento poblacional acelerado y una alta presión vehicular, como es el caso de Jamundí. Además, con estas revisiones, también se indican tendencias o picos de contaminación en relación con jornadas de trabajo como se observa en los estudios para Cali, alcanzando mayores niveles en los horarios sobre los cuales se realiza un desplazamiento vial, entre las 7:00 a 9:00 AM, manteniendo estos niveles hasta la tarde.

A manera de comparación de los niveles obtenidos, se toma como referencia el valor crítico identificado en esta investigación, correspondiente al día de mayor concentración (lunes) en el punto de máxima exposición (Punto G), bajo condiciones de una exposición prolongada (habitantes).

8. Conclusiones

Con este estudio se determinó que las concentraciones de material particulado PM_{10} y $PM_{2.5}$ en la zona urbana central de Jamundí se mantienen dentro de los niveles máximos permisibles por la normativa colombiana (Resolución 2254 de 2017) con una clasificación general de calidad del aire “Aceptable” según el ICA lo que indica posibles síntomas respiratorios en grupos poblacionales sensibles, alineándose en su mayoría con el cumplimiento de las recomendaciones de la OMS (2022), pero, evidenciando superaciones puntuales de los límites recomendados en la consolidación de los datos, particularmente en el horario de la mañana y días críticos, teniendo como referente el lunes. Estos aumentos se vinculan principalmente a fuentes móviles, así como también por la incidencia de los factores ambientales que acondicionan la dispersión de los contaminantes. Por su parte, el análisis de correlación entre ambos contaminantes permitió evidenciar una relación positiva y significativa, indicando que ambos tienden a aumentar de manera simultánea en los periodos evaluados, reforzando que comparten fuentes emisoras, principalmente relacionadas con actividades vehiculares y procesos de combustión, y que su comportamiento ambiental responde a dinámicas similares de dispersión y acumulación en la zona de estudio.

Uno de los elementos que respalda la viabilidad de las fuentes móviles como las principales emisoras del material particulado es el alto flujo vehicular evidenciado en la localidad, como es el caso del punto G, identificado como punto crítico en conjunto con el lunes (día crítico), por presentar las concentraciones promedio mayores. En el punto se registraron los picos para el PM_{10} de $26.66 \mu\text{g}/\text{m}^3$; y para el $PM_{2.5}$ de $20.09 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Al contrastar estos resultados con los registros del informe de calidad del aire de la CVC (2022) y el registro del SISAIRES (2024), se evidencio una mayor consistencia en las concentraciones para $PM_{2.5}$ manteniéndose sobre los valores evidenciados en estas fuentes y reforzando de manera puntual los resultados obtenidos para este contaminante, mientras que el PM_{10} se encuentra ligeramente por debajo de estos registros.

Por su parte, el estudio realizado en Jamundí por Avellaneda Tamayo (2023) evidencio concentraciones más elevadas para los contaminantes con un promedio de $45.29 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} y $27.24 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$, mientras que el estudio realizado por Franco Pineda (2020) en una localidad con condiciones similares al municipio y bajo el mismo contexto del estudio, presenta medias no superiores a $28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el PM_{10} y una concentración media de $PM_{2.5}$ que se mantuvo sobre $12.98 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Pese a las diferencias en estos resultados, tanto estos como otros estudios coinciden en que la variación de las concentraciones se debe a la dinámica de la dispersión (diferente en cada zona de estudio) y las actividades de cada localidad, influyendo de manera directa en la presencia de fuentes fijas y en la intensidad de las fuentes móviles. Además, los estudios atribuyen la variabilidad en sus resultados a las dinámicas ambientales, entre ellas las condiciones meteorológicas que influyen en la dispersión de los contaminantes.

En sentido, al comparar los resultados respecto a la identificación de las fuentes emisoras en otros estudios de una índole similar, a pesar de la diferencia en la metodología adoptada para cada investigación, se concuerda en la identificación de al menos dos factores principales respecto a esta investigación. En primer lugar, las fuentes móviles representan para la mayoría

de estos estudios la principal fuente de material particulado, o al menos una fuente de alta relevancia y considerable impacto en áreas donde la población está bajo una exposición constante. Segundo, el comportamiento de estas emisiones está relacionado con el uso del medio como vehículo de transporte para viajar al trabajo, varios estudios presentan niveles de concentración más altos en jornadas de mañana a tarde, con un aumento progresivo que culmina previo al anochecer, momento para el cual el tránsito vehicular disminuye. Este patrón se alinea entonces con el horario típico laboral.

La exposición estimada para residentes locales revela riesgos acumulativos significativos vinculados a la inhalación de material particulado. En el punto crítico G, bajo un escenario de exposición constante durante 24 horas y con una actividad física moderada, la dosis diaria de PM_{10} alcanzó hasta 998.18 $\mu\text{g}/\text{día}$. Por su parte, bajo un escenario más representativo con la población visitante, la exposición estimada alcanza hasta 160.82 $\mu\text{g}/\text{día}$ para el mismo contaminante. Estos resultados, representan un factor de peligro para grupos sensibles como niños, adultos mayores y personas con enfermedades respiratorias y/o cardiovasculares. Estos hallazgos son consistentes con el estudio de Morales Betancourt et al. (2017), que demostró que, aun en entornos con concentraciones medias más bajas, la exposición prolongada y la alta tasa de inhalación convierten a peatones y residentes en grupos de alto riesgo. Esto explica por qué, en las encuestas realizadas, el 73% de los participantes reportó síntomas asociados a la contaminación (alergias, irritación ocular), a pesar de que el 23% no vinculó estas complicaciones directamente a la calidad del aire. Evidencia científica confirma que, incluso en niveles moderados, la exposición continua acelera la progresión de enfermedades respiratorias crónicas (EPA, 2015), apartado que destaca en áreas como la optada en el estudio para el muestreo, que cuentan con configuración tipo "cañón" (callejones flanqueados por edificios) donde se acumulan contaminantes. Este apartado destaca la necesidad de implementar medidas de mitigación que prioricen la protección de poblaciones vulnerables en entornos urbanos de alta densidad vehicular, combinando mejoras en la calidad del aire con estrategias de reducción del tiempo de exposición.

La percepción de la comunidad, por su parte, evidenció un gran desconocimiento de las condiciones de calidad del aire para la localidad. El 62% identificó al tráfico como principal fuente contaminante, el 98% desconocía las políticas locales para mitigar la contaminación del aire, el 56% no supo evaluar la calidad del aire que respira. Al comparar con bibliografía, se encuentran hallazgos similares en localidades como Bogotá, donde la población percibe una mala calidad del aire y asocian el transporte como la causa principal evidenciado por sus experiencias diarias y la influencia de medios de comunicación que resaltan la problemática. Estos resultados destacan una necesidad de implementar estrategias de educación ambiental accesibles y continuas, enfocadas en campañas de sensibilización que informen correctamente a la comunidad, lo que a su vez favorece en la toma de decisiones cotidianas que pueden tener un impacto en la calidad del aire y exige un mayor fundamento de las políticas públicas necesarias para hacer efectiva una correcta gestión de la calidad del aire.

9. Referencias

- Abdulmalik , A., Abdulrahman , A., & Mohammad , A. (2025). Development of a Toxicity Wind Rose for Particulate Matter in Riyadh: A New Approach to Identifying Pollution Hotspots in the City. *Preprints, 1*. <https://doi.org/10.20944/preprints202505.0053.v1>
- Agencia Europea del Medio Ambiente. (5 de Enero de 2023). *Ministerio de Transporte, Movilidad y Agencia Urbana*. Informe del Estado de la calidad del aire en Europa - EEA: <https://esmovilidad.mitma.es/noticias/informe-del-estado-de-la-calidad-del-aire-en-europa-eea>
- Agibayeva, A., Tleuken, A., Karaca, F., Avcu, E., & Guney, M. (2024). Understanding Public Perception of Air Quality in the Urban Environment of Central Asia: An Empirical Assessment Using Structural Equation Modelling. *Environment and Urbanization, 15*(1), 39-58. <https://doi.org/10.1177/09754253241240155>
- Albaraa A, M., Hatim M, B., Wahaj A, K., & Krassi Rumchev. (2025). Public perception and knowledge on air pollution and its health effects in Makkah, Saudi Arabia. *Journal of the Air & Waste Management Association*(8), 670-681. <https://doi.org/10.1080/10962247.2025.2517779>
- Alcaldía Municipal de Jamundí. (2002). *Componente Ambiental*. PBOT Vigente: <https://www.jamundi.gov.co/Ciudadanos/Paginas/PBOT-Vigente.aspx>
- Alcaldía Municipal de Jamundí. (2021). *Información del municipio*. Alcaldía de Jamundí: <https://www.jamundi.gov.co/MiMunicipio/Paginas/Informacion-del-Municipio.aspx>
- Alcaldía Municipal de Jamundí. (Mayo de 2021). *Plan de Ordenamiento Territorial*. Alcaldía de Jamundí: <https://www.jamundi.gov.co/Ciudadanos/Paginas/PBOT-Vigente.aspx>
- Alcaldía Municipal de Jamundí. (2025). Secretaría de Ambiente. Jamundí, Valle del Cauca, Colombia. <https://www.jamundi.gov.co/Dependencias-1/Paginas/Secretaria-de-Ambiente.aspx>
- Arciniégas Suárez, C. A. (2012). Diagnóstico y control de material particulado: partículas suspendidas. *Revista Luna Azul*, 195-213.
- Ariza, L. V., Sánchez, M. A., & Franco, J. F. (2019). Percepción ciudadana sobre el impacto de la contaminación atmosférica en salud y calidad de vida: estudio piloto. *Revista Épsilon*(21), 173-187. <https://doi.org/https://revistas.lasalle.edu.co/files-articles/ep/vol1/iss21/10/fulltext.pdf>
- Ataz, E. M., & Mera Morales, Y. (2004). *Contaminacion atmosferica*. Cuenca: EDICIONES DE LA UNIVERSIDAD CASTILLA DE LA MANCHA.
- Avellaneda Tamayo, L. F. (2023). Análisis de la exposición a material particulado en una zona residencial del municipio de jamundi, valle del cauca. (*Tesis de pregrado*). Universidad Autónoma de Occidente, Cali, Valle del Cauca, Colombia.
- Barrios Casas, S., Peña Cortes, F., & Osses Bustingorry, S. (2004). Efectos de la contaminación atmosférica por material particulado en en las enfermedades respiratorias agudas. *Ciencia y enfermería, 10*(2), 21-29. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-95532004000200004>

- Behrooz , K., & Sadegh, S. (2024). Long-term exposure to air pollution on cardio-respiratory, and lung cancer mortality: a systematic review and meta-analysis. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 1, 75-95. <https://doi.org/10.1007/s40201-024-00900-6>.
- Belalcazar Franco, M. C., & García Delgado, P. J. (2019). *Evaluación de la calidad del aire en el casco urbano del municipio de Vives - Valle del Cauca*. Universidad Autónoma de Occidente, Santiago de Cali. <https://red.uao.edu.co/server/api/core/bitstreams/cd9aab46-33a3-4342-b84f-734f60530728/content>
- Betancourt Morales, R., Galvis, B., Balachandran, B., Ramos-Bonilla , J., Sarmiento, O. L., Gallo Murcia, S. M., & Contreras, Y. (2017). Exposure to fine particulate, black carbon, and particle number. *ELSEVIER*, 157, 135-145. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.03.006>.
- Carslaw, D. C. (2019). The openair manual. *open-source tools for analysing air pollution data. Manual for version 2.6-6*. University of York. <https://davidcarslaw.com/files/openairmanual.pdf>
- Castillo Lugo, J. J. (2010). Estimación de los beneficios en salud asociados a la reducción de la contaminación atmosférica en Bogotá, Colombia. (*Trabajo de grado*). Universidad De Los Andes, Bogotá.
- CVC. (2020). *Incremento de flujo vehicular y obras en la recta Cali-Jamundí*. Corporacion Regional Valle del Cauca: <https://www.cvc.gov.co/2020014>
- CVC. (2022). *Informe de Calidad del Aire - 2022*. Cali.
- CVC. (2024). *Informe de calidad del aire año 2024 Corporación Regional de Valle del Cauca*. Valle del Cauca, Cali.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2019). *CNPV 2018*. https://sitios.dane.gov.co/cnpv/app/views/informacion/perfiles/76364_infografia.pdf
- DNP. (Julio de 2018). *CONPES 3943*. Departamento Nacional de Planeación: <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3943.pdf>
- Du, X., Chen, & R, K. (2024). Challenges of Air Pollution and Health in East Asia. *Curr Envir Health*, 11, 89-101. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s40572-024-00433-y>
- EPA. (Septiembre de 2011). *About the Exposure Factors Handbook*. United States Environmental Protection Agency: <https://www.epa.gov/expobox/about-exposure-factors-handbook>
- EPA. (2011). *Chapter 16: Activity Factors*. Exposure Factors Handbook: https://www.epa.gov/system/files/documents/2025-01/efh-chapter16_508.pdf
- EPA. (2011). *Chapter 6 — Inhalation Rates*. Exposure Factors Handbook: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-09/documents/efh-chapter06.pdf>
- EPA. (2015). *Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos*. Conceptos básicos sobre el material particulado (PM, por sus siglas en inglés): <https://espanol.epa.gov/espanol/conceptos-basicos-sobre-el-material-particulado-pm-por-sus-siglas-en-ingles>

- Espinosa, M. T., Partanen, T., Piñeros, M., Chaves, J., Posso, H., Monge, P., . . . Wesseling, C. (2005). Determinación del historial de exposiciones. *Revista Panam Salud Publica*, 3(18), 197-196.
- European Environment Agency. (Noviembre de 2011). *Air pollution*. European Environment Information and Observation Network: <https://www.eea.europa.eu/es/themes/air/intro>
- Franco Pineda, D. A. (2020). *Análisis y caracterización del material particulado PM10 y PM2.5 en la ciudad de Manizales*. Universidad Nacional de Colombia, Medellín. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/79214/1053807209.2020.pdf?sequence=4>
- García Navarrete, G., & Rico Soto, K. (2019). Sensores de bajo costo para el monitoreo de calidad del aire. *EPISTEMUS: Ciencia, Tecnología y Salud*, 13(27), 30-37. <https://doi.org/2007-8196>
- Ghisliane, P., Rojas, N., & Mosquera Becerra, J. (2023). Cambios en la calidad del aire asociados al tráfico automotor. *Ingeniería y Competitividad*, 25.
- Gómez Peláez, L. M., Santos, J. M., Taciana Toledo, A. A., Neyval Costa, R. J., Lenker Andreao, W., & Fátima Andrade, M. (2020). Air quality status and trends over large cities in South America. *Environmental Science & Policy*, 114, 422-435. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.09.009>
- Gonzales, J., Quintero, E., García, F., García, A., Sáez, Y., & Collado, E. (2024). Data science-based tool to reduce measurement errors in atmospheric monitoring systems. *LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology*(22). <https://doi.org/DOI:10.18687/LACCEI2024.1.1.1185>
- Habitat Map. (2021). *AirBeam3 User's Guide: Technical Specifications, Operation & Performance*. HabitatMap: <https://www.habitatmap.org/airbeam/users-guide>
- IDEAM. (2019). *Calidad del aire*. IDEAM.GOV: <http://www.ideam.gov.co/web/contaminacion-y-calidad-ambiental/calidad-del-aire>
- IDEAM. (2020). *Informe del Estado de la Calidad del Aire en Colombia 2019*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023898/023898.pdf>
- IDEAM. (2024). *Informe del Estado de la Calidad del Aire en Colombia 2023*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDEAM. (Agosto de 2025). *SISAIRE*. Consulta de mediciones disponibles: <http://sisaire.ideam.gov.co/ideam-sisaire-web/consultas.xhtml>
- Imery Almario, S. (2022). *Evaluación a la exposición por material particulado en vías concurridas por bici usuarios en la ciudad Santiago de Cali*. Universidad Autónoma de Occidente, Santiago de Cali, Colombia. <https://red.uao.edu.co/server/api/core/bitstreams/c78ba8f9-2266-454b-87c0-57e34132ea6d/content>

- Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo. (2006). *INSST. Toma de muestras de aerosoles. Muestreadores de la fracción inhalable de materia particulada*: https://www.insst.es/documents/94886/359418/CR_003_A06.pdf/f87021c9-7046-4bd1-8064-8b73c9a0928b
- IPCC. (2014). *Climate change 2014: Mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/>
- IQAir. (2021). *World Air Quality Report 2020*. IQAir & Greenpeace Southeast Asia: <https://www.iqair.com/dl/pdf-reports/world-air-quality-report-2020-en.pdf>
- Judith Ramírez, L. (18 de Abril de 2021). *¿Conoces qué es el material particulado o polvo que circula en Bogotá?* Gobernación de Bogotá: <https://bogota.gov.co/mi-ciudad/ambiente/que-es-el-material-particulado-o-polvo-en-el-aire>
- Karagulian, F., Belis, A. C., Dora, C. F., Prüss-Ustün, A. M., Bonjour, S., Adair-Rohani, H., & Amann, M. (2015). Contributions to cities' ambient particulate matter (PM): A systematic review of local source contributions at global level. *Elsevier*(120), 475-483. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.08.087>
- Kasdagli , M. I., Orellano, P., Pérez , V., & Samoli, E. (2024). *Long-Term Exposure to Nitrogen Dioxide and Ozone and Mortality: Update of the WHO Air Quality Guidelines Systematic Review and Meta-Analysis*. Public Health. <https://doi.org/10.3389/ijph.2024.1607676>
- Ken, S., & P, B. R. (1988). *Assessment of Human Exposure to Air Pollution: Methods, Measurements, and Models*. National Academies Press (US): <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK218147/>
- Li, C., Xinye, Z., Kun, H., Xiokang, Z., & Yanfang, G. (2022). Association between Particulate Matter Pollution Concentration and Hospital Admissions for Hypertension in Ganzhou, China. *International journal of hypertension*, 1, 11. <https://doi.org/10.1155/2022/7413115>
- Londoño, J., Correa, M. A., & Palacio, C. A. (2011). Estimación de las emisiones de contaminantes atmosféricos provenientes de fuentes móviles en el área urbana de envigado, colombia. *Revista EIA* (16), 149-162.
- Lopez Restrepo, D. (2021). *Expansión Urbana En El Municipio De Jamundí, Camino Al Modelo De Ciudad Difusa Y Fragmentada*. Universidad del Valle, Santiago de Cali, Colombia. <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/entities/publication/6bd5ffaf-934c-4dbb-8057-6183934146f7>
- Maldonado, M. S., & Iglesias Zambrano, P. A. (2023). *Determinación de la calidad del aire de la Universidad Politecnica Salesiana*. Universidad Politecnica Salesiana de Ecuador, Guayaquil, Ecuador. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/26130/1/UPS-GT004641.pdf>
- Manisalidis , I., Stavropoulou , E., tavropoulos , A., & Bezirtzoglou , E. (16 de Junio de 2020). Environmental and Health Impacts of Air Pollution: A Review. *Frontiers in Public Health*, 8. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00014>

- Marcano, J. (s.f.). *Origen Contaminación Atmosférica*. Recursos naturales: <https://jmarcano.com/recursos-naturales/contaminacion/contaminacion-atmosferica/contaminacion-origen/>
- Martínez, A. (Agosto de 2023). Variaciones en el clima: El Niño. *Periodico Alma Mater*. https://www.udea.edu.co/wps/portal/udea/web/inicio/udea-noticias/udea-noticia/!ut/p/z0/fYwxD4IwFIT_igtza8GCI3EwMQ4OxkCX5gUafdj2FSjGny_oYFxcLneX744pVjHl4YFXiEge7JxrJXWx3Yl1mfEjl5nkpTxlm1zs0_OFswNT_4H5Abu-VyVTDflonpFVgYYIdmoNJBzG33QjZz5-0ZWniA3CmPD32mNLC_Wt
- Medina, P., & Edna, K. (2019). La contaminación del aire, un problema de todos. *Revista de la Facultad de Medicina*, 67(2), 189-191. <https://doi.org/https://doi.org/10.15446/revfacmed.v67n2.82160>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (1 de Noviembre de 2017). *Resolución 2254 de 2017*. GOV: <https://www.minambiente.gov.co/documento-entidad/resolucion-2254-de-2017/>
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). *Manual de diseño de sistemas de vigilancia de la calidad del aire*. Minambiente: https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/Protocolo_Calidad_del_Aire_-_Manual_Disenio.pdf
- Ministerio de Transporte. (Octubre de 2019). Gobierno Nacional presenta el estado de la calidad del aire en Colombia y la primera Estrategia Nacional de Calidad del Aire del país: <https://mintransporte.gov.co/publicaciones/7660/gobierno-nacional-presenta-el-estado-de-la-calidad-del-aire-en-colombia-y-la-primera-estrategia-nacional-de-calidad-del-aire-del-pais/>
- Monsalve, M. M. (17 de Marzo de 2023). Asfixiados: Perú, Chile, México, Guatemala y Colombia, los países más contaminados de Latinoamérica. *EL PAÍS*. <https://elpais.com/america-futura/2023-03-17/asfixiados-peru-chile-mexico-guatemala-y-colombia-los-paises-mas-contaminados-de-latinoamerica.html>
- Moriana, L. (Mayo de 2018). *Contaminación atmosférica: causas, consecuencias y soluciones*. Ecología verde: <https://www.ecologiaverde.com/contaminacion-atmosferica-causas-consecuencias-y-soluciones-1247.html>
- Moya, A. J. (3 de Marzo de 2004). *Estimación de la exposición*. UJAEN: http://www4.ujaen.es/~ajmoya/material_docente/estima.htm
- OMS. (2020). *Air Pollution*. Organización Mundial de la Salud: <https://www.who.int/es/health-topics/air-pollution>
- OMS. (19 de Diciembre de 2022). *Contaminación del aire ambiente (exterior)*. OMS: [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health#:~:text=Seg%C3%BAn%20estimaciones%20de%202019%2C%20la,y%20respiratorias%2C%20as%C3%AD%20como%20c%C3%A1nceres](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health#:~:text=Seg%C3%BAn%20estimaciones%20de%202019%2C%20la,y%20respiratorias%2C%20as%C3%AD%20como%20c%C3%A1nceres)
- Porras Castro, C. F. (2023). *Evaluación de la exposición a material particulado PM10 y PM2.5 de los biciusuarios de las ciclorutas del sur de Santiago de Cali*. Universidad del Valle, Cali.

- QuestionPro. (2023). *Tamaño de muestra*. QuestionPro: <https://www.questionpro.com/es/tama%C3%B1o-de-la-muestra.html>
- Ramírez Naranjo, R. (2022). Contaminación atmosférica por material particulado en un territorio urbano y de montaña. Caso de estudio Valle de Aburrá, Colombia. *Tesis de Magister*. Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- Romero, H., Irarrázaval, F., Opazo, D., Salgado, M., & Smith, P. (2010). Climas urbanos y contaminación atmosférica en Santiago de Chile. *EURE* , 35-62.
- Shepard, J. (11 de 10 de 2022). *Cómo utilizar los sensores inteligentes de calidad del aire para la vigilancia del medio ambiente*. DigiKey: <https://www.digikey.com/es/articles/how-to-use-smart-air-quality-sensors-for-environmental-monitoring>
- Solís Segura, L. M., & López Arriaga, J. A. (2003). *Principios básicos de la contaminación ambiental*. Toluca: Universidad Autónoma del Estado de México.
- UNEP. (7 de Septiembre de 2021). *Pollution Action Note – Data you need to know*. UNEP.ORG: https://www.unep.org/interactives/air-pollution-note/?gclid=Cj0KCQjwpc-oBhCGARIsAH6ote_Kp6IBswu7IfgTc7h43Zgwa-48gxaRMhu9ATPNZNHdEKEfiBCexq8aAlWOEALw_wcB
- Universidad EAFIT. (2021). *Informe Anual de Calidad Del Aire 2021 (Contrato Ciencia y Tecnología 799 de 2021)*. Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá (SIATA): https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/informes_red_calidaddeaire/Informe-Anual-Aire-2021.pdf
- Vargas Marcos, F. (2005). La contaminación ambiental como factor determinante. *Revista Española de Salud Pública*, 117-127.
- Watson, J. G., & Chow, J. C. (Mayo de 2000). *Reconciling Urban Fugitive Dust Emissions Inventory and Ambient Source Contribution Estimates: Summary of Current Knowledge and Needed Research*. Nevada: Desert Research Institute.

10. Anexos

Anexo 1. Formato de preguntas calidad del aire:

Formato de preguntas: Percepción de calidad del aire en el centro de Jamundí			
Edad	☐ Menor de 15 años ☐ 15 - 26 años ☐ 27 - 59 años ☐ Mayor de 60 años	Estrato socioeconómico	☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 o mayor
Género	☐ Masculino ☐ Femenino ☐ Otro/s	Nivel de estudios	☐ Ninguna ☐ Primaria ☐ Secundaria ☐ Educación superior
Ocupación			
Formulario de evaluación			
1.	¿Es usted residente de Jamundí? De ser así, ¿cuánto tiempo lleva viviendo en Jamundí?	☐ Menos de 6 meses ☐ 6 meses - 1 año ☐ Más de 1 año	
2.	¿Cuál de los siguientes problemas ambientales cree que tiene un impacto más significativo en su entorno o en su vida cotidiana?	☐ Contaminación del suelo (residuos sólidos) ☐ Contaminación del agua (vertimientos y residuos) ☐ Contaminación del aire (emisiones) ☐ Contaminación acústica (exceso de ruido)	
3.	¿Tiene conocimiento sobre la contaminación del aire y sus efectos en el medio ambiente y la salud?	☐ Sí ☐ No ☐ No está seguro	
4.	En la siguiente escala, ¿cómo calificaría la calidad del aire en Jamundí?	☐ Deficiente ☐ Aceptable ☐ Excelente ☐ Desconoce	
5.	¿Está al tanto de la calidad del aire que respira en la localidad? En caso afirmativo, ¿podría indicar en qué nivel se encuentra?	☐ Desconoce ☐ Parcialmente informado ☐ Está al tanto ☐ Bien informado	

6.	¿Ha experimentado algún efecto negativo en su salud debido a la calidad del aire en la ciudad?	☐ Sí ☐ No ☐ No está seguro
7.	¿Ha experimentado o presenta alguna de las siguientes enfermedades/complicaciones que pueden estar asociadas a la baja calidad del aire?	☐ Enfermedades respiratorias crónicas y/o agudas (Asma, Bronquitis, EPOC, ...) ☐ Agravamiento de enfermedades cardiovasculares ☐ Alergias respiratorias (Rinitis, conjuntivitis, ...) ☐ Irritación de los ojos, nariz y garganta ☐ Otra/s
8.	En la siguiente escala, ¿qué tanto le preocupa la calidad del aire en Jamundí?	☐ Sin preocupaciones ☐ Moderadamente ☐ Preocupado ☐ Consternado
9.	¿Qué factores cree que contribuyen en mayor proporción a la contaminación del aire en la localidad?	☐ Tráfico vehicular ☐ Industrias y fábricas ☐ Quema de residuos ☐ Otros
10.	¿Qué tanto está informado respecto a las medidas que se están tomando para mejorar la calidad del aire en Jamundí? de Conocerlas, ¿está de acuerdo con estas?	☐ Desconoce las medidas aplicadas ☐ Conoce las medidas y le parecen apropiadas ☐ Conoce las medidas y no le parecen apropiadas