



**Análisis de exposición individual a material particulado respirable de operarios de
barrido de la comuna de Belén, 2023.**

**Alejandra Ossa Valencia
Cristian Camilo Londoño Restrepo**

Trabajo de Grado para optar al título de Administrador Ambiental y Sanitario

**Asesor:
Ana María Ramírez Vélez
Administradora en Salud: Gestión Sanitaria y Ambiental
Especialista en Gestión Ambiental**

**Universidad de Antioquia
Facultad Nacional de Salud Pública
“Héctor Abad Gómez”**

Medellín

2024

Cita	Ossa Valencia y Londoño Restrepo (1)
Referencia	(1) Ossa Valencia A, Londoño Restrepo CC. <i>Análisis de exposición individual a material particulado respirable de operarios de barrido de la comuna de Belén, 2023</i> [Trabajo de grado profesional]. Medellín, Colombia. Universidad de Antioquia; 2024.
Estilo Vancouver/ICMJE (2018)	



Biblioteca Salud Pública

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Contenido

Glosario y siglas.....	8
Resumen.....	11
1. Introducción.....	12
2. Planteamiento del problema.....	13
2.1 Antecedentes.....	13
2.2 Descripción del problema.....	14
3. Justificación del proyecto.....	17
4. Objetivos.....	19
4.1 Objetivo general.....	19
4.2 Objetivos específicos.....	19
5. Marcos de referencia.....	20
5.1 Marco teórico.....	20
5.1.1 Contaminación atmosférica.....	20
5.1.2 Material particulado.....	21
5.1.3 Niveles de inmisión y emisión de contaminantes atmosféricos.....	23
5.1.4 Relación de la contaminación del aire sobre la salud humana.....	25
5.1.5 Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire.....	28
5.1.6 Metodologías para la evaluación de exposición personal a la contaminación del aire.....	28
5.2 Marco Legal.....	32
5.2.1 Marco jurídico.....	32
5.2.2 Marco normativo.....	33
5.3 Marco territorial.....	36
6. Metodología.....	39
6.1 Tipo de estudio.....	39
6.2 Área geográfica del estudio.....	39
6.3 Población de estudio.....	39
6.4 Tamaño de la muestra y muestreo.....	40
6.4.1 Criterios de inclusión.....	41
6.4.2 Criterios de exclusión.....	41
6.5 Variables/Categorías.....	42

6.5.1 Operacionalización de variables.....	42
6.6 Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	43
6.6.1 Encuesta de percepción.....	43
6.6.2 Monitoreos individuales.....	44
6.7 Procedimientos de recolección de datos.....	45
6.8 Técnicas y procedimientos de procesamiento de datos.....	51
6.9 Técnicas y procedimientos de análisis de información.....	54
6.10 Publicación y divulgación de resultados.....	54
7. Consideraciones éticas.....	55
8. Resultados.....	56
8.1 Objetivo específico 1.....	56
8.1.1 Información sociodemográfica.....	56
8.1.2 Información ocupacional.....	56
8.1.3 Morbilidad diagnosticada.....	58
8.1.4 Morbilidad sentida.....	59
8.1.5 Percepción personal sobre la calidad del aire.....	60
8.2 Objetivo específico 2.....	61
8.3 Objetivo específico 3.....	66
9. Discusión.....	72
9.1 Comparación con otros estudios sobre percepción personal asociada a la calidad del aire.....	72
9.2 Comparación otros estudios sobre exposición a material particulado respirable.....	73
9.3 Comparación entre exposición personal a material particulado respirable y normativa nacional de calidad del aire.....	76
10. Conclusiones.....	77
Bibliografía.....	78
Anexos.....	87

Índice de tablas

Tabla 1. Niveles recomendados de las directrices sobre la calidad del aire (33).....	23
Tabla 2. Límites máximos de inmisión permisibles establecidos en la Resolución 2254 de 2017 y metas para el año 2030 (34).	24
Tabla 3. Investigaciones de exposición personal realizadas a nivel mundial reportadas en el ISEE.....	30
Tabla 4. Marco jurídico	32
Tabla 5. Concentración mensual y promedio anual de PM _{2.5} en las estaciones de monitoreo de calidad del aire de Altavista y Belén	38
Tabla 6. Variables de la fórmula para la población infinita	40
Tabla 7. Especificación de variables de la fórmula para la población finita	41
Tabla 8. Operacionalización de variables	42
Tabla 9. Resumen de las variables cruzadas.....	71
Tabla 10. Comparación percepción del estado de la calidad del aire con otros estudios.	72
Tabla 11. Comparación de fuentes de contaminación observadas con otros estudios..	72
Tabla 12. Comparación de resultados con otros estudios sobre medición de exposición personal a material particulado respirable.	73
Tabla 13. Rangos de concentración para declaratoria de niveles de prevención, alerta o emergencia.....	76

Índice de figuras

Figura 1. Comparaciones de tamaño de partículas PM	22
Figura 2. Bomba de muestreo personal.....	29
Figura 3. Mapa comuna 16, Belén.....	37
Figura 4. Bomba de muestreo personal.....	44
Figura 5. Ciclón de Nylon de 10 mm	45
Figura 6. Ciclón de aluminio	45
Figura 7. Tren de calibración con TSI	47
Figura 8. Tren de calibración con probeta	48
Figura 9. Desecado y análisis gravimétrico filtros	48
Figura 10. Tren de muestreo instalado en el operario de barrido.....	49
Figura 11. Pesaje final de filtros	50
Figura 12. Distribución del género por grupos de edad (años) en la población encuestada	56
Figura 13. Tipo de zona según el barrio en el que desarrollan sus actividades.	57
Figura 14. Distribución de uso de elementos de protección personal por la población encuestada.....	58
Figura 15. Enfermedades diagnosticadas en población mayor y menor de 40 años. ...	59

Figura 16. Distribución de síntomas manifestados por la población encuestada.	59
Figura 17. Estado de la calidad del aire en el entorno laboral y posible afectación a la salud.	60
Figura 18. Distribución de fuentes de contaminación del aire identificadas por la población encuestada.	61
Figura 19. Promedio concentración por día de la semana.	62
Figura 20. Promedio concentración por barrio para el tiempo muestreado.	63
Figura 21. Promedio concentración por vías principales para el tiempo muestreado. ..	63
Figura 22. Mapa comuna 16 con promedio de concentración por barrio y vía principal.	64
Figura 23. Operarios de barrido por encima y debajo del valor promedio para los cálculos adicionales realizados.	65
Figura 24. Distribución de rangos de edad por encima y por debajo de la concentración promedio de material particulado respirable.	67
Figura 25. Percepción de flujo vehicular en la zona por encima y por debajo de la concentración promedio de material particulado respirable.	68
Figura 26. Tipo de zona donde labora por encima y por debajo de la concentración promedio de material particulado respirable.	68
Figura 27. Sintomatología presentada por los operarios con relación a la concentración promedio de material particulado respirable.	69
Figura 28. Percepción de la calidad del aire en el entorno laboral por encima y por debajo de la concentración promedio de material particulado respirable.	69
Figura 29. Percepción de afectaciones a la salud derivadas de la contaminación del aire por encima y por debajo de la concentración promedio de material particulado respirable.	70
Figura 30. Comparación de promedios de concentración de material particulado respirable con otros estudios.	74
Figura 31. Distribución por rangos de concentración de material particulado respirable en la comuna 16, Belén.	75

Índice de ecuaciones

Ecuación 1. Fórmula para calcular la población infinita.	40
Ecuación 2. Fórmula para calcular la población finita.	41
Ecuación 3. Cálculo de la concentración de partículas respirables, (mg/m^3), en el volumen de aire muestreado (60).	51
Ecuación 4. Cálculo de la estimación de exposición en 24 horas (TWA24h)	52
Ecuación 5. Cálculo de la estimación de exposición en 8 horas (TWA8h).	52
Ecuación 6. Cálculo del tiempo máximo de exposición.	53

Índice de anexos

Anexo 1. Formato de calibración de monitores personales.	87
Anexo 2. Formato de condiciones de trabajo de campo.	88
Anexo 3. Formato de concentraciones obtenidas para cada monitoreo.	89
Anexo 4. Encuesta aplicada a los operarios de barrido.	90
Anexo 5. Registro fotográfico de mediciones realizadas.	97

Glosario y siglas

ACGIH: American Conference of Governmental Industrial Hygienists, Conferencia Americana de Higienistas Industriales Gubernamentales.

AMVA: Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

Caudal: Cantidad de un líquido o un gas que fluye en un determinado lugar por unidad de tiempo (1).

Comuna: Subdivisión territorial en una porción del área urbana (1).

Concentración: Es la cantidad de contaminantes por unidad de volumen de aire (2).

CONPES: Consejo Nacional de Política Social y Económica.

Contaminación atmosférica: Una o más sustancias químicas en concentraciones suficientemente elevadas en el aire pueden hacer daño a los seres humanos, otros animales, a la vegetación o a los materiales (3).

Contaminante: En general, toda sustancia introducida en el medio ambiente con consecuencias adversas para la utilidad de un recurso o para la salud de los seres humanos, animales o ecosistemas (4).

Emisión: Descarga de una sustancia o elemento al aire, en estado sólido, líquido o gaseoso, o en alguna combinación de estos, provenientes de una fuente fija o móvil (5).

EMVARIAS S.A E.S.P.: Empresas Varias de Medellín S.A. E.S.P.

EPA: Environmental Protection Agency, Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos.

Exposición: La cantidad de radiación o contaminante presente en un ambiente dado que representa una amenaza potencial a la salud de organismos vivos (4).

Factor de riesgo: Algo que aumenta la probabilidad de tener una enfermedad (6).

Filtro: Materia porosa, a través de la cual se hace pasar un líquido para clarificarlo de los materiales que lleva en suspensión (1).

FUA: Fundación Universidad de Antioquia.

Fuentes fijas: Fuente de emisión situada en un lugar determinado e inamovible, aun cuando la descarga de contaminantes se produzca en forma dispersa (5).

Fuentes móviles: Fuente de emisión que, por razón de su uso o propósito, es susceptible de desplazarse, como los automotores o vehículos de transporte a motor de cualquier naturaleza (5).

GBD: Global Burden Disease, Carga Mundial de Enfermedad.

IDEAM: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

Inmisión: Transferencia de contaminantes de la atmósfera a un "receptor". Se entiende por inmisión a la acción opuesta a la emisión. Aire inmiscible es el aire respirable a nivel de la troposfera (5).

INS: Instituto Nacional de Salud.

ISEE: International Society for Environmental Epidemiology, Sociedad Internacional de Epidemiología Ambiental.

Material particulado: Mezcla de partículas sólidas y gotas líquidas que se encuentran en el aire (4).

Material particulado respirable: Comprende las partículas de diámetro aerodinámico menor a 10 μm (7).

Microgramo: Unidad de masa que corresponde a la millonésima parte de un gramo (7).

Monitor personal: Dispositivo pequeño y liviano, como un tubo de difusión o un filtro con una bomba que funciona con baterías, que una persona puede llevar o usar durante sus actividades diarias normales (8).

Monitoreo: Seguimiento realizado a un sujeto con el fin de realizar una recolección y análisis de información (9).

Morbilidad: Se refiere a la presentación de una enfermedad o síntoma de una enfermedad, o a la proporción de enfermedad en una población. La morbilidad también se refiere a los problemas médicos que produce un tratamiento (6).

Mortalidad: Término que se refiere a la muerte por cualquier causa (6).

NIOSH: National Institute of Occupational Safety and Health, Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional de los Estados Unidos

OMS: Organización Mundial de la Salud.

Operario de barrido: Persona que realiza el descaneque y el barrido de vías públicas (10).

OPS: Organización Panamericana de la Salud.

PIGECA: Plan Integral de Gestión de la Calidad del Aire.

PM_{2.5}: Material particulado con un diámetro aerodinámico menor o igual a 2,5 micrómetros nominales (5).

RedAire: Red de Vigilancia de la Calidad del Aire.

SIATA: Sistema de Alertas Tempranas del Valle de Aburrá.

SVCA: Sistema de Vigilancia de la Calidad del Aire.

TLVs: Valores Límite Umbral.

Resumen

La contaminación del aire, debido a la expansión de las zonas urbanas, al crecimiento del parque automotor, a los procesos productivos contaminantes, entre otros factores, se ha convertido en una problemática de salud pública a nivel global. La contaminación del aire afecta negativamente a las poblaciones, especialmente a los grupos poblaciones como los operarios de barrido de los espacios públicos que constituyen un grupo de interés para evaluar la exposición al material particulado. **Objetivo:** Establecer la exposición individual a material particulado respirable de los operarios de barrido que laboran en la comuna 16 - Belén del municipio de Medellín, en el periodo de agosto a septiembre de 2023. **Metodología:** Investigación con enfoque descriptivo de corte transversal, en 45 operarios de barrido de la comuna de Belén, a los cuales se les aplicó una encuesta sobre su situación sociodemográfica, ocupacional, morbilidad diagnosticada y sentida y percepción personal asociada a la calidad del aire. Además, se midió la concentración del material particulado respirable a la que estaban expuestos a través de monitores personales. **Resultados:** Se encontró que el 100% de las muestras de material particulado sobrepasó los límites de calidad del aire establecidos por la Organización Mundial de la Salud, con un valor medio de $341 \mu\text{g}/\text{m}^3$, un valor máximo de $1390 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y un mínimo de $130 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de material particulado respirable. Además, se encontró que el barrio con mayor concentración de material particulado respirable fue San Bernardo. **Conclusiones:** El 66,7% de la población encuestada tiene la percepción de que la calidad del aire del sector donde laboran es regular o mala. Esta percepción es coherente con los resultados de los monitoreos realizados, con niveles superiores a los establecidos por la Organización Mundial de la Salud y la Norma Nacional de Calidad del Aire en el 100% de las muestras.

Palabras claves: Material particulado, operario de barrido, Belén, contaminación del aire, exposición personal.

1. Introducción

Debido a los impactos sobre la salud pública, con cifras crecientes de morbimortalidad la contaminación del aire se ha convertido en una prioridad a nivel mundial. Según el Global Burden Disease la tasa de mortalidad atribuible a la contaminación del aire alcanzó un máximo de 54 personas por cada 100.000 habitantes en el 2019, lo que significa un incremento de 15 personas por cada 100.000 habitantes respecto al año 1990(11). En un estudio sobre la carga de enfermedad local atribuible al PM_{2.5} en la ciudad de Medellín, Grisales y colaboradores (2016) encontraron que entre el 2010 y el 2016 se presentaron 3871 muertes atribuibles a este contaminante (12). Estas cifras evidencian el riesgo para la salud de los grupos poblacionales, en especial de los más expuestos a ambientes contaminados, como los operarios de barrido, quienes deben realizar las operaciones de aseo al aire libre en una jornada de aproximadamente 8 horas los 7 días de la semana.

En esta investigación se incluyeron un total de 45 operarios de barrido de la empresa EMVARIAS S.A. E.S.P. Para el estudio se encuestaron los 45 operarios con el fin de establecer algunas variables sociodemográficas y ocupacionales, así como obtener información sobre morbilidad diagnosticada, morbilidad sentida y percepción personal asociada a la calidad del aire. Además, se determinó su exposición a material particulado respirable a través del uso de monitores personales durante aproximadamente seis horas a cada operario entre la última semana de agosto y la tercera de septiembre de 2023.

Este proyecto permitió avanzar en el conocimiento de los niveles de exposición de operarios de barrido a la contaminación atmosférica, específicamente a material particulado, que sirve como base para generar acciones enfocadas en disminuir el impacto en la salud pública, contribuyendo al bienestar y salud de las poblaciones y a la preservación del ambiente, a través de la reducción de la emisión de material particulado y la mitigación de los efectos de la exposición de los grupos poblacionales más expuestos a este tipo de contaminante.

2. Planteamiento del problema

2.1 Antecedentes

La contaminación atmosférica es definida por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) como “una o más sustancias químicas en concentraciones suficientemente elevadas en el aire pueden hacer daño a los seres humanos, otros animales, a la vegetación o a los materiales; tales sustancias o condiciones físicas (como el calor excesivo o el ruido) son consideradas contaminantes del aire” (13). Según el boletín de la Academia Nacional de Medicina de México, la emisión por parte de los automotores y las plantas industriales poco eficientes son la principal causa de la contaminación del aire en el mundo (14).

La contaminación del aire es uno de los principales factores de riesgo para la salud humana, según el Global Burden Disease (GBD), la tasa de mortalidad atribuible al deterioro del ambiente ha venido aumentando durante las últimas dos décadas, la tasa de mortalidad atribuible a la contaminación del aire se incrementó progresivamente desde 39 personas por cada 100.000 habitantes en 1990 hasta 54 en 2019. Mientras según el GBD en el 2019 fallecieron 2,92 millones de mujeres por la exposición a material particulado (11,3 % del total en ese año), 3,75 millones de hombres (12,2%) murieron por esta causa en ese mismo año. Estas cifras indican que 6,67 millones de muertes son atribuibles a la mala calidad del aire, hecho que sitúa la contaminación atmosférica en el cuarto lugar del ranking global de factores de riesgo de mortalidad (11).

El CONPES 3943 del 2018, señala que en Colombia los vehículos son responsables de la emisión del 78% del material particulado (15). De acuerdo con el Registro Único Nacional de Tránsito, el número de vehículos nuevos registrados en Colombia se incrementó de 407.925 en 2019 a 551.144 en el 2022, es decir, un crecimiento de 143.219 vehículos nuevos (35%). El aumento de vehículos ha sido progresivo durante los últimos años, a excepción del año 2020, en el cual se evidenció un descenso significativo marcado por la emergencia sanitaria que enfrentó el país debido al virus SARS-CoV-2 (16).

En un estudio de carga ambiental de enfermedad realizado por el Instituto Nacional de Salud de Colombia (INS), se estimó que el 19% del total de la carga nacional de enfermedad en el 2016 estuvo asociada a factores de riesgo ambiental (aire, agua y otros) causantes de 17.549 muertes, (equivalentes a una tasa de 38,58 muertes por cada 100.000 habitantes), de las cuales 15.681 se asociaron a la mala calidad del aire (17).

El Valle de Aburrá, por su topografía, es decir, al estar su zona urbana rodeada por montañas, ha presentado múltiples eventos de contaminación atmosférica, que enmarcan una alerta roja, dado que se han sobrepasado los niveles máximos permisibles establecidos en la Resolución 2254 de 2017. El estudio “Contaminación atmosférica y sus efectos sobre la salud de los habitantes del Valle de Aburrá”, encontró que el 90% de los días entre 2008 y 2016 presentaron promedios superiores a $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$, convirtiendo al Valle de Aburrá en una de las regiones más contaminadas de las Américas (18). El Plan Integral de Gestión de la Calidad del Aire de 2017 indica que 80% de esta contaminación se debe a la quema de derivados del petróleo, utilizados en el transporte, mientras que 20% proviene de procesos productivos industriales y fuentes de área (19).

Grisales y colaboradores, en su estudio sobre la carga de enfermedad local atribuible al $\text{PM}_{2.5}$ en la ciudad de Medellín, señalaron que entre los años 2010 y 2016 hubo un total de 28.678 muertes por enfermedades agudas y crónicas asociadas a la contaminación del aire en la ciudad, 13.5 % de las cuales son atribuibles al material particulado de 2.5 micras (12).

Piñeros y colaboradores en su estudio sobre la distribución espacial de la morbimortalidad atribuible a la contaminación del aire por $\text{PM}_{2.5}$ en Medellín (Colombia) en el periodo 2010-2016 encontraron que Belén era la comuna con la mayor concentración anual de $\text{PM}_{2.5}$ en el periodo evaluado y con el mayor número de casos geolocalizados de morbimortalidad atribuible al $\text{PM}_{2.5}$. Los autores señalaron que en esta zona predominan procesos extractivos y de producción de arena, arcilla y minería, que constituyen junto con el transporte de estos materiales fuentes importantes de contaminación del aire en la zona. material particulado (20).

2.2 Descripción del problema

La contaminación atmosférica es una problemática que se ha agudizado con el pasar del tiempo y hoy en día es una prioridad a nivel mundial dada la severidad de sus impactos sobre la salud pública.

Desde el año 2003, la Sociedad Internacional de Epidemiología Ambiental (ISEE) ha publicado los trabajos que se han desarrollado sobre el tema a nivel mundial, con un promedio anual entre 1500 y 2000 trabajos. La contaminación ambiental es un área de trabajo muy amplia y aunque los proyectos sobre contaminación del aire son numerosos solo cinco investigaciones por año consideraron el enfoque de exposición personal, lo que indica que solo un 0,25% de los estudios se ocuparon de esta problemática (21).

La ciudad de Medellín, a través de estrategias como el Sistema de Alerta Temprana del Valle de Aburrá (SIATA) y la RedAire, incremento en los últimos años su capacidad de análisis de los impactos de la contaminación atmosférica sobre la población. Debido a múltiples factores se ha enfatizado en el impacto de la mala calidad del aire en la ciudad; un ejemplo de esto son las mediciones realizadas por el SIATA a los contaminantes criterio (PM_{2.5}, PM₁₀, CO, O₃, SO₂, NO₂) las cuales están encaminadas a evaluar la contaminación atmosférica en un ámbito poblacional. Sin embargo, dichos resultados no reflejan la concentración de material particulado a la que realmente está expuesto un individuo.

El estudio “Evaluación de la exposición humana a la contaminación del aire: métodos, mediciones y modelos”, define que hay dos tipos de monitoreos de la contaminación del aire que se pueden realizar. El primero es la medición directa, con el uso de monitores personales para medir la exposición de un subconjunto de la población general, ya sea en ambientes interiores o exteriores. El segundo tipo de monitoreo es la medición indirecta mediante la estimación de la exposición integrada, combinando la medición de las concentraciones de contaminantes en sitios fijos con datos diarios de los tiempos que las personas permanecen en ambientes externos específicos (8).

En todas las poblaciones existen grupos más susceptibles que otros como los niños, los adultos mayores y las mujeres embarazadas o personas con enfermedades respiratorias como el asma y enfermedades cardíacas, entre otros. El estudio de la contaminación del aire a nivel individual es la manera más precisa de evaluar la exposición a la contaminación atmosférica (8).

Considerando que a nivel poblacional hay grupos de individuos más expuestos a la contaminación del aire como las personas que viven cerca de las vías principales o practican actividades y deporte al aire libre; es importante evaluar la exposición personal de los mismos. Los operarios de barrido o también conocidos como “escobitas” del municipio de Medellín, deben atender la recolección de residuos sólidos en áreas asignadas y mantener las calles limpias, sin el uso de ningún elemento de protección contra los contaminantes del aire. Es decir, están expuestos diariamente a concentraciones de contaminantes atmosféricos, especialmente, si trabajan en zonas con alto flujo vehicular o actividad industrial, lo que puede afectar su salud principalmente por enfermedades respiratorias y crónicas (22).

La Facultad Nacional de Salud Pública “Héctor Abad Gómez”, es pionera en estudios sobre exposición personal a la contaminación del aire en diferentes grupos poblacionales del Valle de Aburrá con características diferentes (medios de transporte, ocupación, tiempo de exposición, etc.) como motociclistas (23) y vendedores ambulantes (24). No obstante, no hay estudios sobre los operarios de barrido que recorren las calles en sus

labores de aseo y permanecen varias horas cada día expuestos a la contaminación de material particulado.

En consecuencia, es necesario dar respuesta a la pregunta ¿Cuál es la exposición individual de los operarios de barrido al material particulado respirable y cuál es su percepción sobre la calidad del aire del lugar donde laboran en la Comuna 16 – Belén del municipio de Medellín?

3. Justificación del proyecto

Empresas Varias de Medellín Grupo EPM (EMVARIAS S.A E.S.P.) es la encargada del servicio público de aseo del municipio de Medellín y sus cinco corregimientos (San Antonio de Prado, Santa Elena, Altavista, San Sebastián de Palmitas y San Cristóbal). Una de las funciones de esta entidad, estipulada dentro de los costos fijos establecidos en el cobro de los servicios públicos, es el barrido de áreas públicas, actividad realizada por los operarios de barrido de la organización, conocidos también como “escobitas”. Según EMVARIAS S.A E.S.P., actualmente hay 1.105 operarios en las 16 comunas del municipio de Medellín, los cuales mensualmente barren alrededor de 138.305 kilómetros en las vías y áreas públicas de la ciudad (25).

Medellín, como otros municipios del Valle de Aburrá, ha experimentado en los últimos años un crecimiento poblacional y por ende una rápida urbanización y expansión del territorio. Según la actualización del Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos del municipio, la distancia barrida de áreas y vías públicas se incrementó de 1.291.542 km en el 2015 a 1.538.026 en el 2019. Estas cifras indican que la cobertura de barrido se expande con el tiempo, por tanto, cada vez más individuos laboran como operarios de barrido, lo que incrementa el número de personas que diariamente están expuestas a la contaminación del aire (26).

A través de los registros de la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire del Valle de Aburrá, la cual actualmente es operada por el Sistema de Alertas Tempranas (SIATA), se realiza seguimiento al estado de la calidad del aire, mediante monitoreos ambientales de contaminantes criterios y variables meteorológicas en diferentes puntos del área urbana del Valle de Aburrá, insumo necesario para la toma de decisiones y orientación de los planes de gestión de la calidad del aire de la región. Debido a que la dirección del viento en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá prevalece en sentido Norte-Sur los municipios ubicados al sur son receptores de los contaminantes atmosféricos provenientes de la zona norte. Específicamente, Belén recibe partículas provenientes de 4 municipios del Área Metropolitana (Barbosa, Girardota, Copacabana, Bello). Adicionalmente, según en el informe sobre la caracterización del Material Particulado PM_{2.5} en el Valle de Aburrá Fase IV del AMVA y del Politécnico Jaime Isaza Cadavid, Belén es un referente habitacional por su cercanía al corazón de la ciudad, desarrollos viales y acceso a la movilidad pública y equipamientos con alto impacto para la población.

Aunque en la comuna de Belén existen diversas industrias de bebidas, alimentos y tabaco, aserríos y depósitos de madera, la industria ladrillera sobresale como un renglón económico de la comuna. Por otra parte, según la información de las cámaras de conteo operadas por la Secretaría de Movilidad de Medellín en la zona se presenta una intensa circulación vehicular entre las 4:00 y las 21:00 horas, debido a la circulación de camiones de dos ejes, tractomulas y camiones de carga. Además, se registra tráfico vehicular liviano y transporte de pasajeros, principalmente por el Sistema Integrado de Transporte

del Valle de Aburrá – SITVA (27). En síntesis, Belén es una zona con diferentes zonas industriales y un alto flujo vehicular, que son fuentes locales de contaminación del aire y afectan la calidad de vida de la población que ocupa el territorio.

El desarrollo de esta investigación permitió determinar la concentración de material particulado respirable a la que están expuestos los operarios de barrido en la comuna de Belén. Aunque el proyecto se ocupa de un grupo ocupacional, los resultados indican también el nivel de exposición de vendedores ambulantes, motociclistas, agentes de tránsito que laboran en la comuna de Belén. Lo anterior, constituye un punto de partida ante las autoridades ambientales competentes para tomar medidas que permitan reducir y mitigar la emisión de partículas, además de contribuir al bienestar y salud de las poblaciones, y a la preservación del medio natural y lo que éste implica.

Como ambientalistas y salubristas, evaluar la exposición individual a material particulado respirable en los operarios de barrido en una zona altamente contaminada, nos permitirá encaminar nuestro quehacer a la formulación e implementación de medidas ambientales y sociales para promover la salud pública, de modo que puedan llevarse a cabo las diferentes actividades del diario vivir contribuyendo al bienestar humano y la preservación del ambiente.

4. Objetivos

4.1 Objetivo general

Establecer la exposición individual a material particulado respirable de los operarios de barrido que laboran en la comuna 16 - Belén del municipio de Medellín, en el periodo de agosto a septiembre de 2023.

4.2 Objetivos específicos

- Conocer la percepción de los operarios de barrido de la comuna de Belén sobre la calidad del aire del entorno en que laboran y posibles afectaciones a su salud.
- Establecer mediante la metodología del Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional de los Estados Unidos (NIOSH 0600), la exposición de los operarios de barrido de la comuna de Belén al material particulado respirable.
- Describir la relación entre la concentración de material particulado respirable a la que están expuestos los operarios de barrido y la percepción sobre calidad del aire del entorno y su salud.

5. Marcos de referencia

5.1 Marco teórico

5.1.1 Contaminación atmosférica

De acuerdo con la EPA la contaminación atmosférica es definida como “una o más sustancias químicas en concentraciones suficientemente elevadas en el aire que pueden hacer daño a los seres humanos, otros animales, a la vegetación o a los materiales. Estas sustancias o condiciones físicas (como el calor excesivo o el ruido) son consideradas contaminantes del aire” (13).

Un "contaminante" es un compuesto dañino que rompe el equilibrio de los ecosistemas y de la biósfera. Desde hace mucho, el hombre conoce los peligros de una atmósfera contaminada, ya sea de manera natural (por una erupción volcánica o polen) o provocada por él mismo (los incendios y los desechos). El hombre domina la naturaleza y a veces olvida que es parte de ella. Y, sobre todo, con frecuencia ignora que sus actividades generalmente ocasionan alguna forma de contaminación. Los "contaminantes atmosféricos" son sustancias gaseosas, líquidas o sólidas que se concentran en algunas partes de la atmósfera y que provocan malestares. Sus fuentes de origen pueden ser tan diversas como:

- **Fuentes biogénicas:** provienen de procesos naturales como, erupciones volcánicas, incendios, alergénicos, etc.
- **Fuentes antropogénicas:** son todas aquellas derivadas de la acción humana, entre estas se encuentran las fuentes fijas y las fuentes móviles.

La importancia de cada una de estas fuentes está determinada por la cantidad y el tipo de gases que desechan y por las condiciones meteorológicas de cada lugar (28), y los contaminantes que estas emiten son causales de dos principales tipos de contaminación: la contaminación interior que es aquella que sucede en espacios o lugares cerrados y la contaminación exterior que es la que se da al aire libre (8).

5.1.1.1 Contaminantes atmosféricos

Los contaminantes pueden clasificarse como primarios que son aquellos emitidos directamente de una fuente al aire y secundarios los cuales no se emiten directamente, sino que se forman de las interacciones entre los contaminantes primarios y componentes de la atmósfera (29).

La EPA ha definido seis contaminantes del aire como los principales agentes físicos, químicos y biológicos que alteran las características naturales de la atmósfera y afectan

directamente la salud, el ambiente y la propiedad, entre estos están: Material particulado (PM), ozono (O₃) plomo (Pb), dióxido de azufre (SO₂), monóxido de carbono (CO) y dióxido de nitrógeno (NO₂). Sin embargo, dada la severidad de los efectos sobre la salud pública la OMS ha reconocido como contaminantes criterio los siguientes:

- Material particulado: es un indicador sustitutivo habitual de la contaminación del aire. Se cuenta con sólidos datos científicos que demuestran los efectos para la salud asociados a la exposición a este contaminante. Los principales componentes del material particulado son los sulfatos, los nitratos, el amoníaco, el cloruro de sodio, el carbono negro, los polvos minerales y el agua.
- Monóxido de carbono (CO): es un gas tóxico incoloro, inodoro e insípido que se produce por la combustión incompleta de combustibles carbonados como madera, petróleo, carbón vegetal, gas natural y queroseno.
- Ozono (O₃): el ozono a nivel del suelo —que no debe confundirse con la capa de ozono en la atmósfera superior— es uno de los principales componentes de la niebla fotoquímica y se forma como resultado de la reacción con gases en presencia de luz solar.
- Dióxido de nitrógeno (NO₂): es un gas que por lo general se libera con la combustión de combustibles en los sectores del transporte e industrial.
- Dióxido de azufre (SO₂): es un gas incoloro con un olor penetrante. Se genera como resultado de la quema de combustibles fósiles (carbón y petróleo) y la fundición de menas que contengan azufre (30).

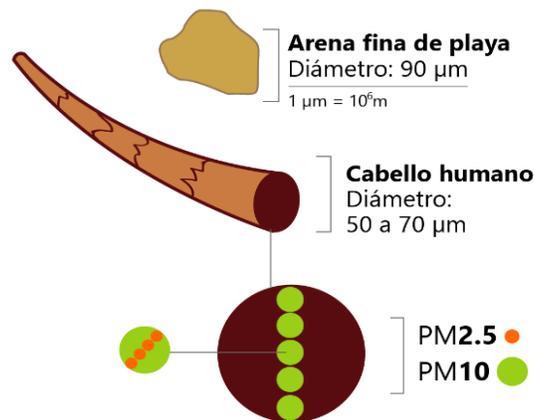
5.1.2 Material particulado

De acuerdo con Echeverri y colaboradores en su estudio “Relación entre las partículas finas (PM_{2.5}) y respirables (PM₁₀) en la ciudad de Medellín”, la “partícula” es un término que se emplea para describir cualquier material sólido o líquido dividido finamente, que es dispersado y arrastrado por el aire y que tiene un tamaño que varía entre 0.0002 y 500 µm. Los términos “aerosol” y “partículas” se utilizan a veces indistintamente, pues los aerosoles se definen como dispersiones de sólidos o líquidos en un medio gaseoso (31).

Adicionalmente, se menciona que estas provienen de procesos de combustión, actividades industriales o fuentes naturales, originándose como resultado de la oxidación de contaminantes gaseosos en la atmósfera y su reacción con vapor de agua. Tanto las fuentes naturales como las antropogénicas emiten partículas a la atmósfera (31).

La contaminación por partículas incluye: PM₁₀ que son partículas inhalables, con diámetros generalmente de 10 micrómetros y menores; y PM_{2.5} como aquellas partículas inhalables finas, con diámetros que generalmente son de 2.5 micrómetros y menores; en la figura 1 se visualiza el tamaño de estas partículas (13).

Figura 1. Comparaciones de tamaño de partículas PM



Fuente: Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (32)

En el informe final del estado de la calidad del aire del municipio de Medellín realizado en el 2021 por el AMVA y el Politécnico Jaime Isaza Cadavid, se estableció que uno de los elementos esenciales es caracterizar el PM_{2.5} en diferentes estaciones de monitoreo, una de estas es la estación MED-BEME, ubicada en la Institución Educativa Pedro Justo Berrío en Belén. El análisis de la composición elemental del PM_{2.5} en este sitio mostro los siguientes resultados por escalas (27):

- **Escala mayoritaria:** elementos con concentraciones entre 1 µg/m³ y 0.1 µg/m³: aluminio (Al) > sodio (Na) > calcio (Ca) > hierro (Fe) > potasio (K) > silicio (Si).
- **Escala minoritaria:** elementos con concentraciones entre 0.1 µg/m³ y 0.01 µg/m³: magnesio (Mg) > zinc (Zn) > titanio (Ti) > bario (Ba) > cobre (Cu).
- **Escala trazas:** elementos con concentraciones entre 0.01 µg/m³ y 0.001 µg/m³: plomo (Pb) > manganeso (Mn) > níquel (Ni) > cromo (Cr) > vanadio (V) > arsénico (As) > antimonio (Sb).
- **Escala ultratrazas:** elementos con concentraciones entre 0.001 µg/m³ y 0.0001 µg/m³: selenio (Se) > molibdeno (Mo) > cadmio (Cd) > cobalto (Co) > mercurio (Hg) > plata (Ag) > berilio (Be), los cuales son de alta importancia por su nivel de toxicidad.

Adicionalmente, el AMVA indica las posibles fuentes de emisión de algunos de estos elementos, donde se encontró que:

- El hierro (Fe), zinc (Zn), cobre (Cu), manganeso (Mn) y el cromo (Cr), en su mayoría en escala minoritaria y trazas, provienen de lubricantes; zinc (Zn) y níquel (Ni) de la combustión del diésel.

- La presencia de zinc (Zn), cobre (Cu), plomo (Pb), cadmio (Cd), antimonio (Sb) y molibdeno (Mo) están asociados a fuentes de Non – exhaust como son el desgaste de neumáticos y pastas de frenos.
- En cuanto al potasio (K) en la escala mayoritaria, evidencia la influencia de incendios (27).

5.1.3 Niveles de inmisión y emisión de contaminantes atmosféricos

A nivel global, la Organización Mundial de la Salud OMS, “ha establecido directrices sobre la calidad del aire relacionadas con la salud para ayudar a los gobiernos y a la sociedad civil a reducir la exposición humana a la contaminación del aire y sus efectos adversos”. Para esto, se ha establecido unos límites máximos permisibles para unos tiempos de exposición de los siguientes contaminantes: PM_{2,5}, PM₁₀, ozono, dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre y monóxido de carbono, en la tabla 1 se visualizan estos límites (33).

Tabla 1. Niveles recomendados de las directrices sobre la calidad del aire (33)

Contaminante	Tiempo promedio	Directrices sobre la calidad del aire OMS (µg/m ³)
PM _{2,5}	Anual	5
PM _{2,5}	24 horas	15
PM ₁₀	Anual	15
PM ₁₀	24 horas	45
O ₃	Temporada alta	60
O ₃	8 horas	100
NO ₂	Anual	10
NO ₂	24 horas	25
SO ₂	24 horas	40
CO	24 horas	4

La Resolución 2254 de 2017 establece los niveles de inmisión permisibles para seis contaminantes atmosféricos en el territorio nacional. Esta norma busca garantizar un ambiente sano y minimizar los riesgos de afectaciones a la salud humana por la mala calidad del aire. En el artículo 2 se establecen los niveles máximos permisibles para el país, y en el artículo 3 se definen las metas a 2030, con el fin de acercarnos a los límites establecidos por la OMS y contribuir a la disminución de la morbilidad por contaminantes atmosféricos; en la tabla 2 se observan los valores mencionados (34).

Tabla 2. Límites máximos de inmisión permisibles establecidos en la Resolución 2254 de 2017 y metas para el año 2030 (34).

Contaminante	Nivel máximo permisible ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Tiempo de exposición	Nivel máximo permisible ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) para 2030
PM₁₀	50	Anual	30
PM₁₀	75	24 horas	No aplica
PM_{2.5}	25	Anual	15
PM_{2.5}	37	24 horas	No aplica
SO₂	50	24 horas	20
SO₂	100	1 hora	No aplica
NO₂	60	Anual	40
NO₂	200	1 hora	No aplica
O₃	100	8 horas	No aplica
CO	5000	8 horas	No aplica
CO	35000	1 hora	No aplica

Cabe recordar que los principales causantes de la mala calidad del aire en el mundo son las industrias y los automóviles, los cuales están clasificados como fuentes de emisión y son de dos tipos:

- Fuentes fijas:** Una fuente fija “es aquella fuente de emisión situada en un lugar determinado e inamovible, aun cuando la descarga de contaminantes se produzca en forma dispersa” (35). Estas pueden ser de carácter puntual, es decir, que emite contaminantes al aire por ductos o chimeneas; o de área, donde los focos de emisión de una fuente fija se dispersan en un área, por razón del desplazamiento de la acción causante de la emisión (35).
En la Resolución 909 de 2008 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial hoy en día Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, se establecen los niveles máximos permisibles de emisión de las industrias según sus características y su función. Los contaminantes de interés son: Material Particulado, SO₂, NO_x, compuestos de fluor inorgánico (HF), compuestos de cloro inorgánico (HCl), hidrocarburos totales (HC τ), dioxinas y furanos, neblina ácida o trióxido de azufre (H₂SO₄), plomo (Pb), cadmio (Cd) y cobre (Cu).
- Fuentes móviles:** Es la fuente de emisión que, por razón de su uso o propósito, es susceptible de desplazarse, como los automotores o vehículos de transporte a motor de cualquier naturaleza (35).
En la Resolución 909 de 2008 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial estableció los niveles máximos permisibles de emisión de contaminantes que deben cumplir las fuentes móviles terrestres según sus características. Los

contaminantes de interés para la resolución son: CO, hidrocarburos (HC), NO_x, hidrocarburos diferentes al Metano (HCNM) y material particulado.

5.1.3.1 Inventario de emisiones en el Valle de Aburrá

Según la EPA, un inventario de emisiones es una base de datos que enumera, por fuente, la cantidad de contaminantes descargados a la atmósfera durante un año u otro período. Estos son una base fundamental para determinar fuentes de emisión significativas y para orientar las medidas reglamentarias de una región (13).

La Universidad Pontificia Bolivariana (UPB) junto con el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, apoyan el Plan Integral de Gestión de la Calidad del Aire a través del inventario de emisiones de la región; para el año 2018, sobre las fuentes móviles se determinó que:

- El parque automotor estaba conformado por 1,550,973 vehículos, de los cuales la mayoría son motocicletas (54.58%), seguida por la categoría automóviles (38.26%). El 7.16% restante corresponde a otras categorías, donde los camiones y los taxis son la mayoría con un 1.97 % y 1.96% respectivamente.
- Se pudo observar que los camiones son los mayores emisores de PM_{2.5}, CO, NO_x y VOC, aportando 37.2%, 54.2%, 39.2% y un 51% del total de las emisiones respectivamente.

Los resultados para las fuentes fijas industriales en el año 2018 fueron:

- Se encontraron 698 empresas en el Valle de Aburrá que emiten contaminantes al aire, responsables por un total de 2138 fuentes.
- El subsector textil es responsable en promedio del 40% de las emisiones tanto del material particulado menor a 10 micras, 2.5 micras y adicionalmente inferior a 1 micra (PM₁₀, PM_{2.5} y PM₁ respectivamente).
- Para el PM₁ el subsector textil aporta el 39%, mientras que el sector de Bebidas, Alimentos y Tabaco aportan el 27%, adicionalmente aparece como tercer emisor importante el subsector Terciario (TER) con un aporte del 15%, esto por el uso de equipos que utilizan gas natural (36).

5.1.4 Relación de la contaminación del aire sobre la salud humana

La exposición a la contaminación del aire se ha vinculado con una variedad de enfermedades que, en muchos casos, ocasionan la muerte de las personas. La contaminación del aire se asocia a:

- Enfermedades cardiovasculares que afectan el corazón y los vasos sanguíneos como la arterosclerosis, los infartos de miocardio, trombos en la sangre, isquemias, accidentes cardiovasculares y fallos fatales del corazón.
- Enfermedades respiratorias que afectan las vías respiratorias como el asma, la enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC), infecciones respiratorias, cáncer de pulmón.
- Por otro lado, la contaminación del aire puede reducir las funciones cognitivas, disminuir nuestro nivel de inteligencia, afectar nuestra capacidad de aprender y memorizar; además puede aumentar los niveles de depresión y ansiedad de las personas (37).

Los efectos del material particulado sobre la salud humana se han asociado históricamente a la exacerbación de enfermedades respiratorias como la bronquitis y más recientemente se han demostrados efectos sobre dolencias de tipo cardiovascular. Investigaciones científicas recientes sugieren que la contaminación por partículas, específicamente las procedentes del tráfico urbano, han contribuido al incremento de morbimortalidad de la población expuesta.

A nivel mundial, el Global Burden of Disease Study (GBD) del año 2017 identificó la contaminación del aire como el quinto factor de riesgo para la salud de la población, por lo que al material particulado de 2.5 micras se le atribuyen el 8,7% del total de las muertes que se presentaron en dicho año, es decir, 4,9 millones de muertes fueron por causa de la exposición a este contaminante. Para el año 2019, pasó a ocupar el cuarto lugar en la escala global de factores de riesgo de mortalidad y se presentaron 6,67 millones de muertes atribuibles a la contaminación por partículas, lo que indica un incremento de 1,77 millones entre los años 2017 y 2019. Mientras para 1990 el GBD estimó una tasa de mortalidad atribuible a la contaminación del aire de 39 personas por cada 100.000 habitantes, para el 2019 esta cifra alcanzó 54 personas por cada 100.000 habitantes (11).

El estudio de Carga de Enfermedad Ambiental en Colombia, realizado por el INS, estimó que para el año 2016 el 19% del total de la carga nacional de enfermedad estuvo asociada a factores de riesgo ambiental (aire, agua y otros factores similares), los cuales causaron 17.549 muertes o el 8% de las 200 mil muertes que se presentan en total cada año en Colombia y que equivalen a una tasa de 38,58 muertes por cada 100.000 habitantes, de las cuales 15.681 fueron por mala calidad del aire. De nueve enfermedades que en el país están asociadas a factores de riesgo ambiental, se le atribuyen cinco a la mala calidad del aire, la enfermedad isquémica del corazón, el accidente cerebrovascular, la enfermedad pulmonar obstructiva (EPOC), las infecciones respiratorias agudas y las cataratas (17).

Según el estudio sobre la carga de enfermedad local atribuible al PM_{2.5} en Medellín del investigador Hugo Grisales de 28.678 muertes por enfermedades agudas y crónicas

asociadas entre los años 2010 y 2016, 3.873 se le atribuyen al material particulado de 2.5 micras, es decir, 13,5% de las muertes (12).

El panorama global, nacional y local de mortalidad atribuible a la contaminación del aire, muestra que las muertes por factores de riesgo ambiental van a seguir incrementándose con el tiempo. Los casi 4 millones de habitantes que tiene el Área Metropolitana están ubicados en 1.157 km, es decir, el 58,5% de la población del departamento de Antioquia está ubicado en el 1,8% del área y mientras se sigan aumentando el número de habitantes y el consumo se incrementara la contaminación también. Además, se ha demostrado que la ubicación de una gran urbe dentro de un valle o cadena de montañas, puede tener un efecto negativo sobre la dispersión de contaminantes, caso del Valle de Aburrá, cuyos municipios están asentados en un valle estrecho, rodeado de altas montañas y las condiciones climáticas (cambios predecibles anualizados de época seca a época de lluvias y viceversa) afectan la dispersión de los gases y las partículas generadas por la industria, el transporte y los hogares” (22).

En el análisis ocupacional de la enfermedad, la Federación de Aseguradores Colombianos (FASECOLDA) estimó que, para el año 2022 en Antioquia hubo un total de 2.018.828 trabajadores registrados, de estos, se presentaron 3.175 enfermedades laborales calificadas y un total de 3 muertes por enfermedad laboral calificada. De lo anterior, es posible inferir vacíos en la información, debido a que la clasificación se realiza por sector económico y no se discrimina el tipo de ocupación de los individuos (38).

5.1.4.1 Material particulado y sus efectos en la salud humana

El material particulado de 2.5 micras, por su tamaño, es totalmente respirable y tiene la capacidad de viajar internamente por el organismo. Adicional a esto, es más ligero y por eso, generalmente permanece más tiempo en el aire, lo que prolonga la exposición y facilita su transporte por el viento a grandes distancias (39).

La exposición a estas partículas puede afectar tanto a los pulmones como al corazón. Además, puede ocasionar los siguientes efectos adversos:

- Muerte prematura en personas con enfermedades cardíacas o pulmonares.
- Infartos de miocardio no mortales.
- Latidos irregulares.
- Asma agravada.
- Función pulmonar reducida.
- Síntomas respiratorios aumentados, como irritación en las vías respiratorias, tos o dificultad para respirar.

La exposición a material particulado afecta en su mayoría a personas con enfermedades cardíacas o pulmonares, niños, niñas y adultos mayores y personas que practican deportes al aire libre (37).

5.1.5 Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire

De acuerdo con el IDEAM, un Sistema de Vigilancia de la Calidad del Aire “SVCA” es entendido como un conjunto de equipos de monitoreo de los contaminantes atmosféricos, que se encuentran instalados en un lugar de interés con un propósito determinado, su implementación es necesaria cuando se presenta una problemática específica relacionada con la calidad del aire, o en zonas con población por encima de los cincuenta mil habitantes (40).

El SVCA del Área Metropolitana es operado por el SIATA y dispone de 28 estaciones de monitoreo de calidad del aire en gran parte del Valle de Aburrá, mediante las cuales se evalúan contaminantes atmosféricos como ozono troposférico, óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono, PM₁₀, PM_{2.5}, entre otros. Particularmente, en la comuna de Belén hay dos estaciones, una en el barrio Las Mercedes y otra en Altavista, que miden la concentración de PM_{2.5} y son consideradas estaciones urbanas de fondo, ya que están ubicadas de manera que el nivel de contaminación no está influenciado significativamente por fuente o calle alguna (41).

Desde 1992 distintas instituciones han analizado la calidad del aire en el Valle de Aburrá, hecho que permitió la conformación de la RedAire como una estrategia para realizar proyectos conjuntos para mejorar el conocimiento y formular estrategias que permitan mejorar la calidad del aire en la región por parte del AMVA en compañía de la Universidad Pontificia Bolivariana, la Universidad Nacional, el Politécnico JIC, la Universidad de Antioquia, entre otras (42).

5.1.6 Metodologías para la evaluación de exposición personal a la contaminación del aire

La medición de exposición personal a la calidad del aire se puede evaluar mediante mediciones directas, es decir, uso de monitores personales o mediante datos de monitores de sitios fijos combinados con patrones de tiempo-actividad de una población (8).

5.1.6.1 Uso de monitores personales

El monitoreo personal se define como un seguimiento a un sujeto con el fin de recolectar y analizar la información. Se realiza mediante un dispositivo pequeño y liviano, como un tubo de difusión o un filtro con una bomba que funciona con baterías, que una persona puede llevar o usar durante sus actividades diarias normales, este se puede observar en la figura 2 (8).

Figura 2. Bomba de muestreo personal



Fuente: SIAFA. Bomba de muestreo de aire de caudal constante marca Sensidyne-Gilian, modelo GilAir3 (43).

Según Barry Ryan y Sexton, al usar una herramienta de medición personal esta metodología permite inferir los lugares donde se producen las concentraciones más altas, así como la naturaleza de las fuentes de emisión. Estos autores afirman que el monitoreo personal directo es el medio más preciso de evaluación de la exposición, pero también es el más costoso. Debido a que los estudios de monitoreo personal a gran escala son un desarrollo reciente, aún no se han resuelto muchos problemas de diseño, logística y técnicos de encuestas (8).

Desde el año 2003 la ISEE ha publicado los trabajos desarrollados a nivel mundial en el área ambiental, con un promedio anual de 1800 trabajos. De estos, alrededor de 50 y 100 investigaciones son sobre contaminación atmosférica y únicamente 5 se ocupan de la exposición personal a la contaminación del aire, es decir, un 0,25% del total de los estudios (21). En el periodo entre 2003 y 2019 solo 6 estudios emplearon equipo de monitores personales, revelan información precisa sobre la población de estudio, el escenario de investigación y el tiempo durante el cual se realizó la medición, estos se detallan en la tabla 3.

Tabla 3. Investigaciones de exposición personal realizadas a nivel mundial reportadas en el ISEE

Titulo	Fecha de realización o publicación	Población de estudio	Escenario de estudio	Tiempo de medición	Equipo de medición
Metales cancerígenos en partículas finas en suspensión en el aire (PM _{2.5}), daños en el ADN y disfunción pulmonar relacionada en trabajadores expuestos al tráfico en Taiwán	Entre noviembre de 2008 y enero de 2009	28 policías de tránsito	Área urbana (ciudad de Hsinchu en Taiwán)	12 horas durante el día	Muestreadores de aire personales (no se especifica información)
Exposición a la contaminación del aire y metilación y acetilación de la histona 3 en individuos altamente expuestos en Beijing, China: un estudio de medidas repetidas	2008	60 conductores de camiones y 60 trabajadores de oficina	Área urbana	8 horas	Monitores portátiles (no se especifica información)
Exposición ambiental y personal a PM ₁₀ en mujeres en relación con la actividad temporal, el estatus socioeconómico y el lugar de residencia en Delhi, India	2011	6 mujeres con diferentes estratos socioeconómicos	Área urbana	6 horas (10 a.m. a 4 p.m.) durante 3 días	Monitor personal sidepack
Un enfoque holístico para la evaluación de la exposición microambiental: exposiciones personales en el hogar, el trabajo y los desplazamientos diarios a la contaminación del aire por partículas	Entre septiembre de 2012 y febrero de 2014	45 personas residentes de Fort Collins, Colorado, Estados Unidos	Área urbana	4 horas aproximadamente, durante 8 días distribuidos de 4 a 12 semanas	Monitor personal PEM SKC
Exposición personal y ocupacional a partículas finas relacionadas con el tráfico en Accra, Ghana	2017	29 conductores de minibuses, 26 taxistas y 44 vendedores ambulantes	Área urbana	24 horas de medición	Muestreadores de aire personales (no se especifica información)

Titulo	Fecha de realización o publicación	Población de estudio	Escenario de estudio	Tiempo de medición	Equipo de medición
Exposición personal a la contaminación del aire PM _{2.5} y patrones de movilidad en mujeres embarazadas hispanas de bajos ingresos en Madres	2019	63 mujeres en embarazo	Área urbana (ciudad de Los Angeles, Estados Unidos)	Continuo durante 5 días	RTI MicroPEM

En Colombia, en los últimos años se realizaron diferentes estudios para evaluar la exposición personal a material particulado en ambientes exteriores que lindan con calles de alto flujo vehicular, estos son:

- Evaluación de la exposición personal y de área a material particulado PM_{2.5} y PM₁₀ en el Valle de Sogamoso por Galán Vega (44).
- Nivel de exposición personal a material particulado inhalable PM_{2.5} proveniente de vías de alto tráfico vehicular de la ciudad de Barranquilla por Rodríguez Reales y Núñez Blanco (45).
- Estimaciones de exposición personal a material particulado, níquel y cobalto en actividades de ciclorruta día domingo desde la calle 170 con 9 hasta la calle 116 con 15 en el tramo norte de la ciudad de Bogotá, Colombia por Rodríguez Sotomonte y Sánchez Orjuela (46).
- Estudio de la exposición a material particulado 2.5 a lo largo de corredores viales principales en la ciudad de Bogotá por Jaramillo Meneses (47).

En el Valle de Aburrá, se encontraron dos investigaciones en las cuales se ha usado la metodología de monitoreo personal para la evaluación de la exposición a la contaminación atmosférica. Ramírez Vélez evaluó la exposición personal de motociclistas en la zona centro de Medellín (23) y Segura Tirado realizó el mismo proyecto y en la misma zona con la población de venteros informales (24).

Estas son investigaciones de corta duración con grupos que comparten características similares, como ocupación laboral o residencia. Es decir, son diseñadas para evaluar las condiciones específicas de una subpoblación (8).

5.1.6.2 Modelos de regresión de usos del suelo (LUR)

El proyecto European Study of Cohorts for Air Pollution Effects (ESCAPE), ha definido los modelos de regresión del uso de la tierra (LUR) como un método estadístico que

utiliza datos geoespaciales para desarrollar modelos de predicción en ciencias ambientales y de la salud (48). Esta metodología se ha usado para estimar y explicar la variabilidad de las concentraciones de contaminantes del aire en un lugar determinado, en base a unas variables explicativas como proximidad por parte de las personas a vías existentes, densidades del tráfico en un territorio determinado, entre otras (49).

El Valle de Aburrá ha sido objeto de investigaciones que buscan evaluar la contaminación del aire. Entre ellos se pueden destacar los trabajos de Grisales Vargas (50) y Londoño Ciro (49), en los cuales se han propuesto metodologías para la aplicación de modelos de regresión de usos del suelo con el fin de caracterizar y estimar la concentración de contaminantes, principalmente del material particulado.

5.2 Marco Legal

5.2.1 Marco jurídico

En la Tabla 4 se detalla toda la normatividad legal asociada al proyecto.

Tabla 4. Marco jurídico

Norma	Fecha de expedición	Entidad que expide la norma	Objeto	Artículos/capítulos de interés
Constitución Política de Colombia	Julio 4 de 1991		Principal fuente de derecho en Colombia (51).	Art. 79
Ley 9 de 1979	Enero 24 de 1979	Ministerio de Salud	Medidas sanitarias (52).	Art. 80,81,100,101,110
Ley 99 de 1993	Diciembre 22 de 1993	Congreso de Colombia	Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA (53).	
Decreto 1072 de 2015	Mayo 26 de 2015	Ministerio de Trabajo	Decreto Único Reglamentario del Sector Trabajo (54).	Capítulo VI
Resolución 909 de 2008	Junio 5 de 2008	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial	Estándares de emisión admisibles de contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas (55).	

Norma	Fecha de expedición	Entidad que expide la norma	Objeto	Artículos/capítulos de interés
Resolución 910 de 2008	Junio 24 de 2008	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial	Niveles permisibles de emisión de contaminantes que deberán cumplir las fuentes móviles terrestres (56).	Capítulo II.
Resolución 650 de 2010	Marzo 29 de 2020	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial	Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire (57).	Art.2
Resolución 2254 de 2017	Noviembre 1 de 2017	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	Norma de Calidad del aire(34).	Capítulo I, II.

5.2.2 Marco normativo

5.2.2.1 Guías de la calidad del aire OMS

El propósito de las guías de la OMS es ofrecer recomendaciones cuantitativas relativas a la salud para la gestión de la calidad del aire, expresadas como concentraciones a largo o corto plazo de una serie de contaminantes atmosféricos clave. Estas recomendaciones no son normas jurídicamente vinculantes, pero proporcionan a los estados miembros de la OMS una herramienta para la elaboración de leyes y políticas (33).

5.2.2.2 Programa de calidad del aire de la OPS/OMS

Desde la Unidad de Cambio Climático y Determinantes Ambientales de la Salud la Organización Panamericana de la Salud, junto con la Organización Mundial de La Salud, establecieron una hoja de ruta del programa de calidad del aire en la agenda estratégica para la inclusión de salud en la gestión de la calidad del aire del año 2018. En esta hoja de ruta se identificó que:

- 21 países tienen estándares de la calidad del aire, pero solo 13 tienen leyes, políticas o reglamentos.
- 20 países cuentan con información sobre calidad del aire ambiental a nivel superficial en al menos una ciudad, pero solo nueve tienen programas de aseguramiento y control de calidad de datos.
- Solo siete países tienen planes con acciones específicas para mejorar la calidad del aire a nivel nacional o en al menos una ciudad.

En cuanto a los Objetivos de Desarrollo Sostenible “ODS” en la gestión de la calidad del aire, se tiene:

- Objetivo 3, salud y bienestar: reducir sustancialmente el número de muertes y enfermedades producidas por productos químicos peligrosos y la contaminación del aire, el agua y el suelo. Indicador: Tasa de mortalidad atribuible a la contaminación del aire en las viviendas y ambiental en el exterior.
- Objetivo 7, energía asequible y no contaminante: garantizar el acceso universal a servicios energéticos asequibles, fiables y modernos. Indicador: Proporción de la población que depende principalmente de combustibles y tecnologías limpias.
- Objetivo 11, ciudades y comunidades sostenibles: reducir el impacto ambiental negativo per cápita de las ciudades, incluso prestando especial atención a la calidad del aire y la gestión de los desechos municipales y de otro tipo. Indicador: Niveles promedios anuales de partículas finas (PM_{2.5} y PM₁₀) en las ciudades (ponderado por la población) (58).

5.2.2.3 Valores Límite Umbral (TLVs) de la Conferencia Americana de Higienistas Industriales Gubernamentales (ACGIH)

Los valores límite umbral (TLV) son determinaciones realizadas por un grupo de expertos, voluntarios e independientes. Son pautas diseñadas para ser utilizadas por higienistas industriales en la toma de decisiones con respecto a los niveles seguros de exposición a diversas sustancias químicas y agentes físicos en el lugar de trabajo (59). La NIOSH 0600 referencia a la ACGIH y para el material particulado respirable este valor se encuentra en 3 mg/m³(60).

5.2.2.4 Documento CONPES 3943 de 2018

La política para el mejoramiento de la calidad del aire incluye un diagnóstico de la contaminación atmosférica a nivel nacional. Se presentan datos de emisiones provenientes de fuentes fijas, móviles y adicionalmente, se estudia el actuar de las autoridades ambientales frente a esta problemática.

El documento CONPES 3943 define una política con el objetivo de reducir los niveles de contaminación atmosférica que afectan la salud y el ambiente, mediante la reducción de emisiones por fuentes fijas, móviles y el fortalecimiento de las estrategias de prevención, reducción y control de la contaminación en el aire (15).

5.2.2.5 Plan Integral de Gestión de la Calidad del Aire (PIGECA)

El PIGECA es un documento del AMVA, que “contiene un conjunto de estrategias para reducir los niveles de contaminación y mejorar la calidad del aire del Valle de Aburrá a

corto, mediano y largo plazo; además contiene medidas, metas e instrumentos de medición; para mantener un aire limpio, proteger la salud de la población y propiciar un desarrollo metropolitano sostenible”.

En este documento se realiza un diagnóstico de la situación actual del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, incluyendo los factores que favorecen la contaminación del aire, el grado de deterioro actual, los impactos sobre la salud. Además, se establecen metas y objetivos a cumplir con el fin de mejorar la calidad del aire de la región (19).

4.2.2.6 Reglamento interno de trabajo Empresas Varias de Medellín S.A. E.S.P. – EMVARIAS S.A E.S.P.

Este reglamento tiene como objeto “regular las relaciones laborales que rigen entre EMVARIAS S.A E.S.P. y los servidores públicos vinculados a ella”. Dentro de este el artículo 62 es de interés para la investigación.

Artículo 62: “Los servidores deberán someterse a todas las medidas de higiene y seguridad que prescriban las autoridades del ramo en general, y a las que ordene la empresa, para la prevención de enfermedades y riesgos en el lugar de trabajo, especialmente para evitar accidentes de trabajo”.

Parágrafo. “Los servidores deberán hacer uso de los implementos de protección personal que les suministre la empresa para el ejercicio de sus funciones laborales” (61).

5.3 Marco territorial

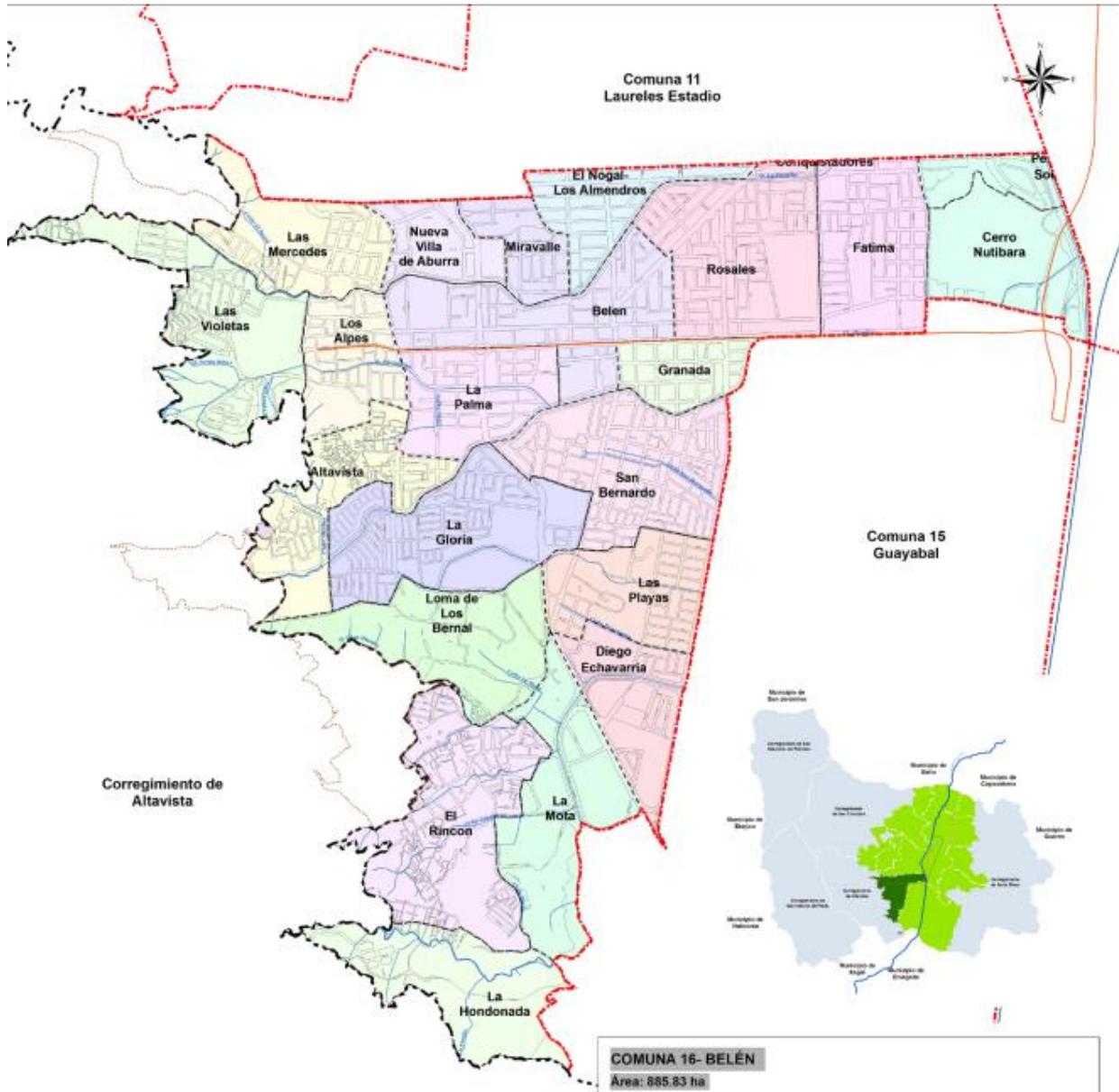
Medellín está ubicado al noroccidente de Colombia, más exactamente en el departamento de Antioquia y junto a otros nueve municipios conforman la región del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, de sur a norte son: Caldas, La Estrella, Sabaneta, Envigado, Itagüí en el sur, Medellín en el centro del valle, Bello, Copacabana, Girardota y Barbosa en el norte.

Además de ser la capital del departamento de Antioquia, es la segunda ciudad más poblada de Colombia después de Bogotá. Según los datos del censo 2018, del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), a ese año Medellín contaba con una población de 2.427.129 habitantes, 47% hombres y 53% mujeres.

La ciudad está distribuida político-administrativamente en dieciséis comunas: Popular, Santa Cruz, Manrique, Aranjuez, Castilla, Doce de Octubre, Robledo, Villa Hermosa, Buenos Aires, La Candelaria, Laureles- Estadio, La América, San Javier, El Poblado, Guayabal y Belén y cinco corregimientos: Palmitas, San Cristóbal, Altavista, San Antonio de Prado y Santa Elena. La ciudad tiene un total de 249 barrios urbanos oficiales (62).

El área de interés es Belén, la comuna N°16 de Medellín, localizada en la zona suroccidental de la ciudad. Limita por el norte con la Comuna número 11 Laureles – Estadio, por el oriente con la Comuna número 15 Guayabal, al Sur y al Occidente con el Corregimiento de Altavista; en la figura 3 se detallan los barrios de esta comuna. (63).

Figura 3. Mapa comuna 16, Belén



Fuente: Alcaldía de Medellín. Plan de Desarrollo Local Comuna 16, Belén (64)

En el 2020 la comuna de Belén tenía 197.593 habitantes en sus 21 barrios, es decir, el 7,8% del total de la población de Medellín. De esta población, 72.736 son mujeres y 64.758 son hombres, un 36,8% con edades entre los 29 y 54 años. Adicionalmente, cerca del 25% de los habitantes del territorio se movilizan en bus, el 21% en transporte particular y el 17% se desplaza caminando a su trabajo (65).

Para el año 2023, en la comuna 16 se realizaban mediciones de calidad del aire a través de dos estaciones fijas semiautomáticas que miden material particulado PM_{2.5}, la estación 83 (Belén) está ubicada en la Institución Educativa Pedro Justo Berrio y la estación 79 (Altavista) se localiza en la Institución Educativa Pedro Octavio Amado. Adicionalmente, se cuenta con cinco ciudadanos científicos que monitorean PM_{2.5}, en los barrios La Mota, Las Playas, La Gloria y Miravalle. En la tabla 5 se pueden observar la concentración promedio mensual y anual para las estaciones mencionadas (41).

Tabla 5. Concentración mensual y promedio anual de PM_{2.5} en las estaciones de monitoreo de calidad del aire de Altavista y Belén

Mes	MED-ALTA (µg/m ³)		MED-BEME (µg/m ³)	
	2021	2022	2021	2022
Enero	19	19.8	18.2	21.4
Febrero	21.8	24.5	21	26.6
Marzo	22.9	22.9	22.8	26
Abril	18.7	16	18.3	19.5
Mayo	17.2	17.7	16.7	19.8
Junio	15.6	18.7	17.9	20.2
Julio	15.1	17	18.4	15.9
Agosto	18.4	18.4	20.1	17.6
Septiembre	18.4	20.7	20.2	20.7
Octubre	19.8	19.3	21.6	20.4
Noviembre	19.3	17.9	23.7	20
Diciembre	20.5	22	21.9	19.1
Promedio anual	18.9	19.6	20.1	20.6

Nota. Valores extraídos del informe de calidad del aire del AMVA 2021 (66), 2022 (67).

6. Metodología

6.1 Tipo de estudio

Esta investigación tiene un enfoque descriptivo de corte transversal (68), que buscó conocer algunas variables socio demográficas y ocupacionales de los operarios de barrido, su percepción sobre la contaminación del aire y establecer sus niveles de exposición a material particulado en un periodo de tiempo de su jornada laboral y zona de trabajo determinada. Se evaluó la concentración de material particulado respirable menor a 3 micras a la cual están expuestos 45 operarios de barrido de la comuna de Belén en agosto y septiembre del 2023, un periodo de no contingencia ambiental por calidad del aire, es decir, con condiciones atmosféricas y meteorológicas de base favorables para la dispersión de contaminantes (27).

6.2 Área geográfica del estudio

El área geográfica del estudio fue la comuna 16 del municipio de Medellín, Belén, la cual está ubicada en la zona suroccidental de la ciudad, limita al norte en la calle 32 con la comuna 11, Laureles; al oriente, en la carrera 70 con la comuna 15, Guayabal; y al suroccidente en la calle 9 sur y la carrera 84 con el corregimiento de Altavista. En esta comuna, se ubican 21 barrios: Fátima, Rosales, Belén, Granada, San Bernardo, Las Playas, Diego Echavarría, La Mota, La Hondonada, El Rincón, La Loma de los Bernal, La Gloria, Altavista, La Palma, Los Alpes, Las Violetas, Las Mercedes, Nueva Villa de Aburrá, Miravalle, El Nogal-Los Almendros y Cerro Nutibara.

Belén tiene usos de suelos variados, aunque predomina el uso residencial e institucional, dentro del sector se destacan el Aeropuerto Olaya Herrera y las ladrilleras de Altavista. Además, en la zona se encuentra el Cerro Nutibara uno de los siete cerros tutelares de Medellín (64).

6.3 Población de estudio

La población de estudio comprendió los operarios de barrido de EMVARIAS S.A E.S.P., los cuales son contratados a través de la Fundación Universidad de Antioquia (FUA). Actualmente trabajan 1.105 operarios de barrido en las 16 comunas del municipio de Medellín. Belén, según la distribución realizada por EMVARIAS S.A E.S.P., está ubicada en la zona 6 (Belén, Guayabal) y cuenta con 77 operarios de barrido, los cuales están encargados de realizar las actividades de aseo del ambiente exterior en el sector (25).

6.4 Tamaño de la muestra y muestreo

Al tratarse de un estudio descriptivo de corte transversal, para definir el tamaño de la muestra se emplearon las siguientes fórmulas:

- **Población infinita (69).**

La ecuación 1 detalla la fórmula para calcular la población infinita y en la tabla 6 se detallan las variables de la fórmula para la población infinita.

Ecuación 1. Fórmula para calcular la población infinita

$$n' = \frac{z_{1-\frac{\alpha}{2}}^2 * \sigma^2}{e^2}$$

Tabla 6. Variables de la fórmula para la población infinita

Población infinita (n')	
Cuantil de confianza (z)	95% ≈ 1,96
Varianza (σ)	$\sigma = \frac{\text{Valor máximo} - \text{Valor mínimo}}{4}$ $\sigma = \frac{47,1 - 7,5}{4}$ $\sigma = 9,9$ <p>Valores de referencia de PM_{2.5} de la estación de monitoreo Institución Educativa Pedro Justo Berrio en Belén.</p>
Error relativo (e)	$e = 20\%$ $e = \sigma * 0,20$ $e = 9,525 * 0,20$ $e = 1,91$

Nota. *Valores obtenidos de informe anual de calidad del aire del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, año 2022 (67).

Entonces;

$$n' = \frac{1,96^2 * 9,90^2}{1,91^2} \quad n' = 103,21$$

- **Población finita** (69).

La ecuación 2 presenta la fórmula para calcular la población finita y en la tabla 7 se detallan las variables de la fórmula para la población finita.

Ecuación 2. Fórmula para calcular la población finita

$$n' = \frac{N+n'}{N*(n'-1)}$$

Tabla 7. Especificación de variables de la fórmula para la población finita

Población finita (n)	
Tamaño de la población (N)	$N = 77$
Población infinita (n')	$n' = 103,21$

Entonces;

$$n' = \frac{N*n'}{N+(n'-1)} \quad n' = \frac{77*103,21}{77+(103,21-1)} \quad n' = 44,35 \simeq 44$$

Por lo anterior, el tamaño de muestra del estudio abarcó 44 operarios de barrido que se eligieron por conveniencia. Los participantes fueron elegidos entre los 77 operarios de barrido que laboran en Belén y que aparecen en el listado entregado por la Fundación Universidad de Antioquia. Además, la FUA nos compartió las rutas de barrido de la comuna de Belén, la elección de las rutas se hizo teniendo en cuenta que el punto de partida fuera cercano y la participación voluntaria del operario.

6.4.1 Criterios de inclusión

- Participación voluntaria en el estudio mediante el diligenciamiento del consentimiento informado.
- Operario de barrido no fumador durante su jornada laboral.

6.4.2 Criterios de exclusión

- Muestreo bajo condiciones de lluvia.
- Muestreo con un tiempo inferior al 70% de la jornada laboral, es decir, menor a 5 horas y 35 minutos aproximadamente.

Nota: Las mediciones se realizaron durante aproximadamente 6 horas, debido a que los jueves y viernes la jornada laboral de los operarios de barrido es más corta, buscando que el tiempo de muestreo fuera igual para todos los operarios en los 5 días de la semana monitoreados.

6.5 Variables/Categorías

6.5.1 Operacionalización de variables

La tabla 8 muestra las variables que se tuvieron en cuenta a la hora de realizar la encuesta a los operarios de barrido.

Tabla 8. Operacionalización de variables

Variables sociodemográficas		
Nombre	Cualitativa	Nominal
Género	Cualitativa	Nominal
Edad	Cuantitativa	Escala
Barrio de residencia	Cualitativa	Nominal
Nivel de estudios	Cualitativa	Ordinal
En caso de ser mujer, ¿está en embarazo?	Cualitativa	Nominal
Variables ocupacionales		
Lugar de trabajo	Cualitativa	Nominal
Tiempo de antigüedad en la zona	Cuantitativa	Escala
Uso de elementos de protección personal	Cualitativa	Nominal
Protección auditiva	Cualitativa	Nominal
Protección ocular	Cualitativa	Nominal
Guantes para protección	Cualitativa	Nominal
Protección respiratoria	Cualitativa	Nominal
Ropa de protección	Cualitativa	Nominal
Protección para pies	Cualitativa	Nominal
Medidas específicas frente a contingencias ambientales	Cualitativa	Nominal
Flujo vehicular durante su trayectoria	Cualitativa	Ordinal
Labora en una zona industrial	Cualitativa	Nominal
Labora en una zona institucional	Cualitativa	Nominal
Labora en una zona residencial	Cualitativa	Nominal
Labora en una zona comercial	Cualitativa	Nominal
Exposición al humo de cigarrillo en el entorno laboral	Cualitativa	Nominal
Morbilidad diagnosticada		
Hospitalización en los últimos seis meses	Cualitativa	Nominal
Motivo de hospitalización	Cualitativa	Nominal

Enfermedades respiratorias	Cualitativa	Nominal
Enfermedades cardiovasculares	Cualitativa	Nominal
Morbilidad sentida asociada a la calidad del aire		
Dificultad para respirar	Cualitativa	Nominal
Dolor o sensación de opresión y/o pesadez en el pecho	Cualitativa	Nominal
Frecuentemente le dan ataques de tos	Cualitativa	Nominal
Congestión nasal	Cualitativa	Nominal
Gripas frecuentes	Cualitativa	Nominal
Alteración en la garganta	Cualitativa	Nominal
Ardor, irritación, enrojecimiento en los ojos	Cualitativa	Nominal
Ardor, irritación, enrojecimiento en la piel	Cualitativa	Nominal
Percepción personal sobre la contaminación del aire		
Calidad del aire de su entorno laboral	Cualitativa	Ordinal
Presencia de fuentes de contaminación en su trayectoria	Cualitativa	Nominal
Quema de basuras	Cualitativa	Nominal
Emisiones industriales	Cualitativa	Nominal
Emisiones vehiculares	Cualitativa	Nominal
Estaciones de servicio	Cualitativa	Nominal
Durante su jornada laboral, la contaminación del aire afecta su salud	Cualitativa	Nominal
Medidas específicas ante contingencias ambientales de calidad del aire	Cualitativa	Nominal

6.6 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

6.6.1 Encuesta de percepción

Instrumento diseñado en Google Forms compuesto por cinco categorías: variables sociodemográficas, ocupacionales, morbilidad diagnosticada y sentida y, la percepción personal del operario de barrido frente a la contaminación del aire.

Una vez diseñado el instrumento y con el fin de saber si las preguntas eran de fácil entendimiento para los operarios de barrido, se realizó una prueba piloto con tres operarios que realizaban sus labores de limpieza de calles alrededor la Facultad Nacional de Salud Pública, lo que permitió identificar los ajustes que eran necesarios, entre estos se identificó que era importante considerar “ninguna” como una opción de respuesta en varias de las preguntas, además se replantearon algunas de éstas.

La encuesta se aplicó a los operarios que participaron en la evaluación de exposición al material particulado. En el consentimiento informado se informó a los operarios sobre el

objetivo de la investigación y su participación voluntaria, en este se escribió el nombre del operario, el número de contacto, la firma y el código de la muestra.

6.6.2 Monitoreos individuales

Para cuantificar la concentración de material particulado respirable a la que estaban expuestos los operarios de barrido de la comuna de Belén, se realizaron mediciones directas en los operarios de acuerdo con el método NIOSH 0600. Es de anotar que, aunque la muestra determinó ejecutar 44 mediciones personales, en total se realizó el proceso para 52 muestras, previendo que algunas de éstas podrían ser descartadas debido a los criterios de exclusión definidos.

Para realizar las mediciones se usaron los siguientes equipos y elementos:

- Bomba de muestreo personal marca GilAir3: Es un monitor personal que funciona con batería recargable, el cual garantiza el control automático de caudal constante; a esta se le instala un filtro de membrana de cloruro de polivinilo (P.V.C) de 37 mm de diámetro y 5 μm de tamaño de poro. El equipo debe ser calibrado antes y después de cada medición; en la figura 4 se observa la bomba de muestreo personal (8).

Figura 4. Bomba de muestreo personal



- Los filtros de membrana de cloruro de polivinilo (PVC) son ideales para usar en el control del aire en busca de metales, sílice y polvo. Su captación de baja humedad lo hace ideal para su uso en análisis gravimétricos.
- Ciclón de Nylon de 10 mm: Generalmente va sobre un soporte metálico que se acopla a un cassette de 37 mm de diámetro, de 2 o 3 cuerpos que contiene un filtro apropiado a la metodología analítica que se va a aplicar (70). El caudal de 1,7 l/min es el más recomendado por adaptarse al convenio de la fracción respirable según la NIOSH 0600; en la figura 5 se visualiza el ciclón antes detallado (60).

Figura 5. Ciclón de Nylon de 10 mm



- Ciclón de Aluminio de 10 mm: El ciclón de aluminio SKC es un muestreador personal de la fracción respirable ligero de peso, que se utiliza acoplado a un cassette de 3 piezas con un filtro. Este muestreador está disponible en 2 tamaños para ser utilizado con cassette de 25 mm o de 37 mm. La fracción respirable se recoge en el filtro y la no respirable en el capuchón inferior; en la figura 6 se visualiza este ciclón (70).

Figura 6. Ciclón de aluminio



6.7 Procedimientos de recolección de datos

Con el listado de rutas de barrido de Belén entregado por la Fundación Universidad de Antioquia, el cual es confidencial y, por tanto, no se puede detallar en esta investigación, se eligieron 52 rutas y se realizaron 4 muestreos por día. Se considero un punto de inicio de las 4 rutas diarias cercano, con el fin de localizar fácilmente a los operarios. En total se seleccionaron 15 barrios de Belén.

Una vez seleccionados los operarios de barrido participantes en la investigación y diligenciado el consentimiento informado en formato físico, se les aplico la encuesta de manera personal y en un formato digital. El cuestionario contenía 5 categorías de preguntas con el objeto de conocer tanto el operario como el entorno laboral. Cada pregunta independiente de su naturaleza, abierta o cerrada, estuvo dirigida y registrada

por el encuestador, de modo que pudiera completarse toda la información solicitada correctamente.

La cuantificación del material particulado respirable menor a 3 micras se realizó bajo la metodología 0600 del Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional de los Estados Unidos (NIOSH), la cual comprendió las siguientes etapas:

- **Preparación del tren de muestreo**

Antes de iniciar la recolección de muestras se verificó el correcto funcionamiento del equipo, para esto se calibro la bomba de muestreo y se prepararon los filtros. La calibración de la bomba se realizó de forma manual, con el fin de configurarla al caudal recomendado por la metodología NIOSH 0600 según el ciclón a usar. Para este caso, la bomba se calibró con un caudal de 1,7 l/min para el ciclón de nylon y de 2.5 l/min para el ciclón de aluminio.

Las dos primeras semanas de muestreo se utilizaron los siguientes instrumentos:

- Medidor de flujo TSI 4146
- Tubo flexible
- Filtro de PVC en blanco
- Estabilizador
- Cassete de cristal
- Destornillador de pala

La calibración se realizó mediante el uso de un calibrador de flujo de aire TSI 4146, para esto, se conectó la bomba de muestreo personal a un estabilizador mediante un tubo flexible, el cual a su vez se conectó a la parte baja del ciclón. De la parte alta del cassette sale otro tubo flexible que se conectó directamente al TSI generando un conducto de aire entre la bomba y el TSI, y posteriormente este mostraba el flujo de aire en el que se encontraba la bomba de muestreo.

Del TSI, por tanto, se tomaban tres valores, un valor cada 5 segundos y luego se sacaba un promedio verificando que el valor estuviera de acuerdo con el recomendado por la NIOSH 0600 según el material del ciclón utilizado; en la figura 7 se muestra el tren de calibración usando el TSI.

Figura 7. Tren de calibración con TSI



En la última semana la calibración se realizó manual, utilizando los siguientes instrumentos:

- Probeta graduada plástica
- Beaker de vidrio
- Tubo flexible
- Filtro de PVC en blanco
- Cassete de cristal
- Cronometro
- Destornillador de pala

El montaje inició conectando la bomba de muestreo a la parte inferior del ciclón a través del tubo flexible, y en la parte superior del cassette se instaló otro tubo flexible que lo unía a la probeta. Después de tener el tren de muestreo armado, se depositó una solución jabonosa en el beaker con capacidad de producir burbujas, luego de encender la bomba de muestreo se procedía a generar una burbuja con el rebose de la probeta, aprovechando la succión de la bomba. El método consistía en medir el tiempo que tardaba la burbuja en recorrer 100 ml de la probeta y se calculaba el caudal utilizando la siguiente formula en Microsoft Excel:

$$Q = \frac{V}{T}$$

Donde:

Q= Caudal en litros por minuto

V= Volumen muestreado en litros

T= Tiempo de recorrido de la burbuja en minutos

Este proceso se repetía tres veces donde se calculaba el promedio verificando que el valor estuviera de acuerdo con el recomendado por la NIOSH 0600 según el material del ciclón utilizado; en la figura 8 se observa el tren de calibración usando la probeta graduada plástica.

Figura 8. Tren de calibración con probeta



En ambos casos, si la bomba no se encontraba dentro del valor recomendado, es decir, para ciclón de nylon 1,7 l/min y para ciclón de aluminio 2,5 l/min, se debía ajustar el caudal utilizando un destornillador de pala y girando el tornillo de la bomba ya sea para aumentar o disminuir el flujo según la necesidad.

La preparación de los filtros se realizó en la zona de pesaje del área de higiene Ambiental del Laboratorio de la Facultad Nacional de Salud Pública, por parte de la analista encargada. Antes del pesaje, los filtros se expusieron a un desecador eléctrico por 24 horas, con el fin de retirar la de humedad. Luego se realizó el análisis gravimétrico inicial de cada filtro, empleando una balanza analítica digital calibrada anualmente por una entidad externa y que antes del pesaje debía estar verificada con una masa patrón de 5 g. El promedio del peso de los filtros se tomó como el peso de cada filtro analizado; en la figura 9 se observa el proceso mencionado.

Figura 9. Desecado y análisis gravimétrico filtros



Para la preparación del tren de muestreo que debía llevar el operario, se colocó el filtro secado y pesado dentro del cassette, el cual fue montado sobre el ciclón y se verificó que quedara correctamente ajustado y en una posición apropiada. Este ciclón se conectó a través de un tubo flexible a la bomba de muestreo la cual debía estar totalmente cargada y calibrada a un flujo de 1,7 l/min en el caso del ciclón de nylon y 2,5 l/min para el ciclón de aluminio.

- **Recolección de muestras**

La recolección de muestras se realizó cumpliendo el criterio mínimo de evaluar el 80% de la jornada laboral del operario, es decir, aproximadamente 6 horas. Para esto, se instaló el tren de muestreo en la parte posterior de la cintura del operario de barrido, comprobando que quedara asegurado. Se ajustó el tubo que conecta la bomba con el cassette en la espalda y el hombro, garantizando que el extremo del tubo, el ciclón y el cassette quedaran a la misma altura de la clavícula.

Adicionalmente, se comprobó la estanqueidad de los equipos y que ninguno se invirtiera, pues en caso de que sucediera, del ciclón puede caer material de mayor tamaño sobre el filtro y contaminar la muestra. Hecho esto, se puso en funcionamiento la bomba que dio inicio al proceso de muestreo.

El funcionamiento de la bomba y de las conexiones se explicó en detalle al operario, con el fin de que el monitoreo se realizara de la manera adecuada. De igual manera, se dejaron dos números de contacto en caso de que tuvieran alguna duda o dificultad durante el muestreo; en la figura 10 se observa el tren de muestreo instalado en uno de los operarios de barrido.

Figura 10. Tren de muestreo instalado en el operario de barrido



- **Retiro del equipo y verificación final**

Al finalizar el muestreo se detuvo la operación de la bomba de monitoreo y se registró la duración. Luego de realizar la calibración final del caudal, en el laboratorio se retiró el filtro del ciclón, cubriendo los orificios del cassette, con el propósito de que no se contaminara la muestra.

Para la post calibración del caudal se repitió el proceso de la calibración previa a la toma de muestras. Como criterio de validez la diferencia entre el valor de la calibración previa y posterior a la medición no debe ser mayor al 10%.

Antes de proceder con el análisis gravimétrico final de las muestras, se verificó el cumplimiento de los siguientes puntos de control:

- Calibración de las bombas de muestreo, previa y posterior al muestreo. Si esta calibración presentaba una diferencia superior al 10%, la muestra se descartaba.
- Muestreo con un tiempo inferior al 70% de la jornada laboral, se descartaba la muestra.
- Filtros con rupturas no procedía con el monitoreo o análisis gravimétrico final, se descartaba la muestra.
- Desconexión del tren de muestreo en campo e inadecuada reinstalación, se descartaba la muestra.
- Manipulación indebida del filtro en la instalación o desinstalación de la muestra, contaminando el mismo, se descartaba la muestra.

- **Pesaje final de filtros**

Para el análisis gravimétrico final de filtros posterior al monitoreo, se aplicó el mismo procedimiento de pesaje inicial descrito en el numeral de preparación del tren de muestreo. Producto de este análisis el Laboratorio entregó un reporte de pesaje incluyendo el peso inicial y final de cada filtro, con el fin de determinar la masa del filtro y calcular la concentración de cada una de las muestras; en la figura 11 se observa el proceso de pesaje final de filtros.

Figura 11. Pesaje final de filtros



Para este proceso y la verificación de equipos e instalación de los trenes de muestreo se aplicaron los lineamientos establecidos en el Laboratorio de Higiene Ambiental de la Facultad Nacional de Salud Pública de la Universidad de Antioquia.

Aunque en la investigación se realizaron 52 análisis de exposición personal a material particulado respirable, solo 45 muestras fueron viables ya que 7 no cumplieron con los criterios establecidos como el tiempo de monitoreo, altas variaciones entre la calibración inicial y la final o se presentó alguna falla técnica entre las conexiones.

6.8 Técnicas y procedimientos de procesamiento de datos

Las respuestas obtenidas producto de la encuesta aplicada a los operarios de barrido fueron organizadas y digitalizadas en cada una de las categorías a las que pertenece, consolidando una base de datos a través del software Microsoft Excel.

Para el registro de la calibración del caudal de muestreo de las bombas de monitoreo, pre y post muestreo, se empleó un formato en Microsoft Excel donde se diligenciaron datos como: fecha, serie de la bomba, promedio de calibración inicial y final, porcentaje de diferencia de caudales, entre otros. Adicionalmente, se contó con otro formato para el trabajo de campo, donde se registró la fecha de medición, código de muestra, barrio, hora de inicio y de finalización del muestreo y observaciones (ver anexos 1 y 2).

Los resultados de los muestreos fueron digitados en Microsoft Excel, programa en el cual se calculó la concentración de partículas respirables para cada monitoreo personal, empleando la fórmula detallada en la ecuación 3.

Ecuación 3. Cálculo de la concentración de partículas respirables, (mg/m^3), en el volumen de aire muestreado (60).

$$C = \frac{(W_2 - W_1) - (B_2 - B_1)}{V} \times 10^3$$

Donde;

W₁ = peso de tara del filtro antes del muestreo (mg)

W₂ = peso del filtro que contiene la muestra después del muestreo (mg)

B₁ = peso medio de la tara de los filtros en blanco (mg)

B₂ = peso medio de los filtros en blanco después del muestreo (mg)

V = volumen muestreado al caudal nominal (es decir, 1,7 l/min o 2,2 l/min).

10³ = factor de conversión para pasar de miligramos a microgramos.

Adicional al cálculo de la concentración de partículas respirables que nos indica la NIOSH 0600, se tuvieron en cuenta las siguientes fórmulas:

- **Estimación de exposición en 24 horas (TWA_{24h})**

Como se indicó anteriormente, la recolección de muestras se realizó durante un tiempo promedio de 6 horas, por tanto, fue necesario estimar la concentración para 24 horas como criterio adicional para realizar comparaciones con los valores máximos permisibles de la OMS y de la norma nacional de calidad del aire. Esto se realizó mediante la expresión propuesta por, Jaramillo Meneses, la cual se observa en la ecuación 4 (47).

Ecuación 4. Cálculo de la estimación de exposición en 24 horas (TWA_{24h})

$$TWA_{(24h)} \left(\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} \right) = \frac{(C_m * t_m) + (C_p * t_c)}{24}$$

Donde;

TWA_(24h) = exposición en 24 horas

C_m = concentración del muestreo

t_m = tiempo de muestreo (horas)

C_p = concentración promedio de PM_{2.5} (para esta se tomó el promedio de las estaciones del SIATA, MED-ALTA y MED-BEME, entre el mes de septiembre del año 2022 y septiembre del 2023)

t_c = tiempo complemento = 24 – t_m

- **Estimación de exposición en 8 horas (TWA_{8h})**

Este cálculo se realiza con la finalidad de conocer la concentración a la que están expuestos los operarios de barrido durante una jornada laboral completa, y poder comparar con los valores ocupacionales establecidos por los TLV's de la ACGIH. Para esto se utilizó la formula descrita en la ecuación 5.

Ecuación 5. Cálculo de la estimación de exposición en 8 horas (TWA_{8h})

$$TWA_{(8h)} \left(\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} \right) = \frac{(C_m * t_m)}{480_{min}}$$

Donde;

TWA_(8h) = exposición en 8 horas

C_m = concentración del muestreo

t_m = tiempo de muestreo (minutos)

- **Tiempo máximo de exposición**

Este indicador, expresa el tiempo en el que un operario de barrido llega a la concentración máxima recomendada por la OMS para 24 horas, la cual actualmente es de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Este dato se obtiene teniendo en cuenta lo expresado en la ecuación 6.

Ecuación 6. Cálculo del tiempo máximo de exposición

$$Q_1 * T_1 * C_1 = Q_2 * T_2 * C_2$$

Donde;

C_1 = promedio de la concentración hallada

C_2 = concentración recomendada por la OMS

T_1 = promedio de exposición máxima

T_2 = tiempo estipulado por la OMS (24h)

Q_1 = caudal promedio ingresado al organismo.

Q_2 = caudal promedio de aire ingresado al organismo = $Q_1 * \text{Tiempo de muestreo}$

Entonces;

$$T_1 = \frac{(Q_2 * T_2 * C_2)}{(Q_1 * C_1)}$$

Para el cálculo del caudal promedio ingresado al organismo (Q_1), se tuvo en cuenta lo Fieramosca y colaboradores, quienes consideran que un ser humano sano en reposo respira con una frecuencia de 12 a 15 veces por minuto, en cada una de estas respiraciones se inspiran y expiran 500 ml de aire (71), por tanto, el caudal promedio ingresado es 6750 ml/min de aire.

Luego de obtener la concentración de partículas de $\text{PM}_{2.5}$ para cada monitoreo personal y los demás cálculos, los valores fueron digitalizados en la base de datos previamente construida en el software Microsoft Excel (ver anexo 1). Por último, esta base de datos de variables cualitativas y cuantitativas fue exportada en conjunto al programa de análisis estadístico IBM SPSS Statistics 22.

6.9 Técnicas y procedimientos de análisis de información

La información cuantitativa se graficó a través del método Gaussiano, el cual permitió analizar la distribución de los datos mediante el uso de las medidas de tendencia central y de dispersión. Para los datos con distribución normal, se calculó el promedio como valor central y se estimó la desviación estándar, con el fin de determinar el nivel de dispersión de los datos con respecto al promedio. Por el contrario, para la información con distribución no normal, se calculó la mediana y el rango intercuartílico de los datos o en su defecto la varianza.

Los datos de las mediciones realizadas en los operarios de barrido fueron llevados al software QGIS, con el fin de asociar el mapa de la comuna de Belén y cada uno de sus barrios con la concentración de material particulado, identificando los valores máximos y mínimos de exposición personal. Así mismo, se analizaron las concentraciones de material particulado ambiental de las estaciones de monitoreo MED-BEME y MED-ALTA que operaron durante el mismo periodo de las mediciones realizadas a nivel de exposición personal.

Con la información cualitativa se hallaron frecuencias y promedio de los datos y se agrupó la información, con el fin de establecer las diferencias y/o similitudes entre las condiciones sociodemográficas, laborales, de salud y percepción personal de los operarios de barrido.

Con los datos cualitativos de las encuestas realizada en Google Forms se realizó un análisis de variables cruzadas, con el fin de conocer las relaciones entre diferentes individuos y obtener una comprensión más profunda de las respuestas obtenidas. Se procesó la información empleando el software IBM SPSS Statistics 22 y se analizaron los resultados aplicando estadística descriptiva. Los resultados se presentaron en tablas y gráficos.

Se hizo un análisis cruzado con la información cualitativa y cuantitativa para establecer la relación entre las concentraciones de material particulado respirable a la que están expuestos los operarios de barrido y su percepción sobre calidad del aire del entorno y su salud, complementado con información teórica sobre exposición a material particulado respirable en ambientes exteriores.

6.10 Publicación y divulgación de resultados

Los resultados derivados de la investigación se dispondrán en el repositorio institucional de la Universidad de Antioquia. También, serán socializados en jornadas de investigación y con los directivos de la Fundación Universidad de Antioquia.

7. Consideraciones éticas

Esta investigación se desarrolló conforme a los criterios de anonimidad y confiabilidad de los datos suministrados por la Fundación Universidad de Antioquia. El estudio se ampara bajo la figura de habeas datas (ley 1266 de 2008), la cual hace referencia al derecho constitucional que tienen todas las personas a conocer, actualizar y rectificar las informaciones que se hayan recogido sobre ellas en bancos de datos, y garantías constitucionales relacionadas con la recolección, tratamiento y circulación de datos personales a que se refiere el artículo 15 de la Constitución Política, así como el derecho a la información establecido en el artículo 20 de la Constitución Política (72). De acuerdo con lo anterior, la información obtenida fue consolidada en las bases de datos Excel y SPSS Statistics, a las cuales tenían acceso únicamente los dos investigadores y la asesora de este proyecto. Cabe resaltar, que toda la información recopilada se utilizó con fines educativos y para dar cumplimiento a los objetivos propuestos en esta investigación.

8. Resultados

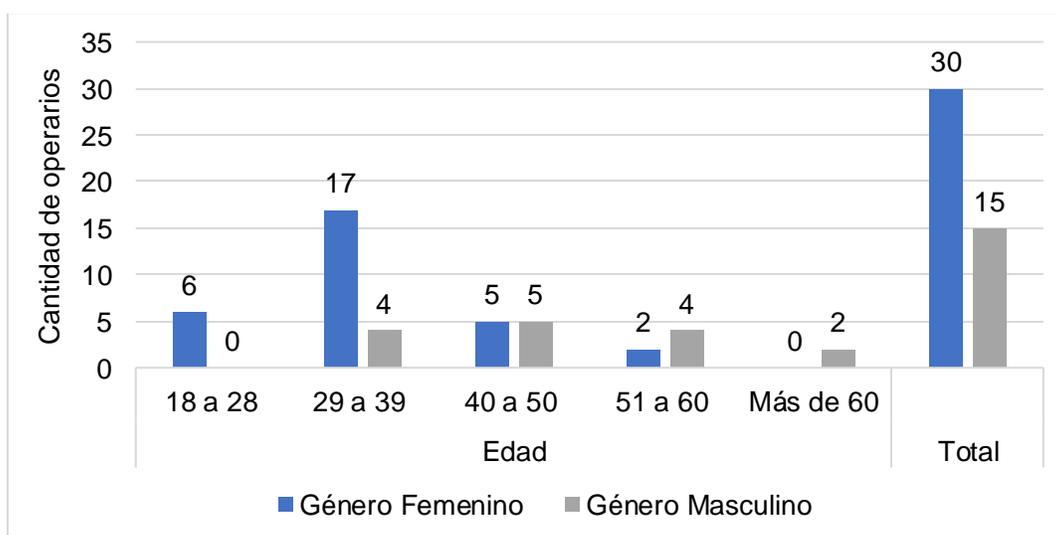
A continuación, se presentan los resultados de la encuesta de caracterización de la población de estudio y de los muestreos de material particulado respirable en los operarios de barrido de la comuna de Belén.

8.1 Objetivo específico 1

8.1.1 Información sociodemográfica

Según la Figura 12, la distribución por género de las 45 personas encuestadas indicó que un 33,3 % eran hombres y un 66,7% mujeres. La edad de los encuestados fluctuó entre 23 y 63 años y alcanzó un promedio de 39 años, con un 48,9% de la población en el rango de edad entre 29 y 39 años; esta distribución se puede observar en la figura 12.

Figura 12. Distribución del género por grupos de edad (años) en la población encuestada



De acuerdo con el nivel de formación el 62,2 % de los encuestados cursó hasta secundaria, el 31,1% curso hasta la primaria, el 4,4% no tiene ningún tipo de estudio y un solo operario contaba con estudios superiores.

Un 84,5 % del total de los encuestados reside en 12 de las 16 comunas del municipio de Medellín, el 15,6% en la Comuna 3 (Manrique) y el 11,1% en la Comuna 13 (San Javier). Entre el 15,6% que habitan fuera de Medellín, se destacan como sitios de residencia los municipios de Bello, La Estrella y algunos corregimientos de Medellín.

8.1.2 Información ocupacional

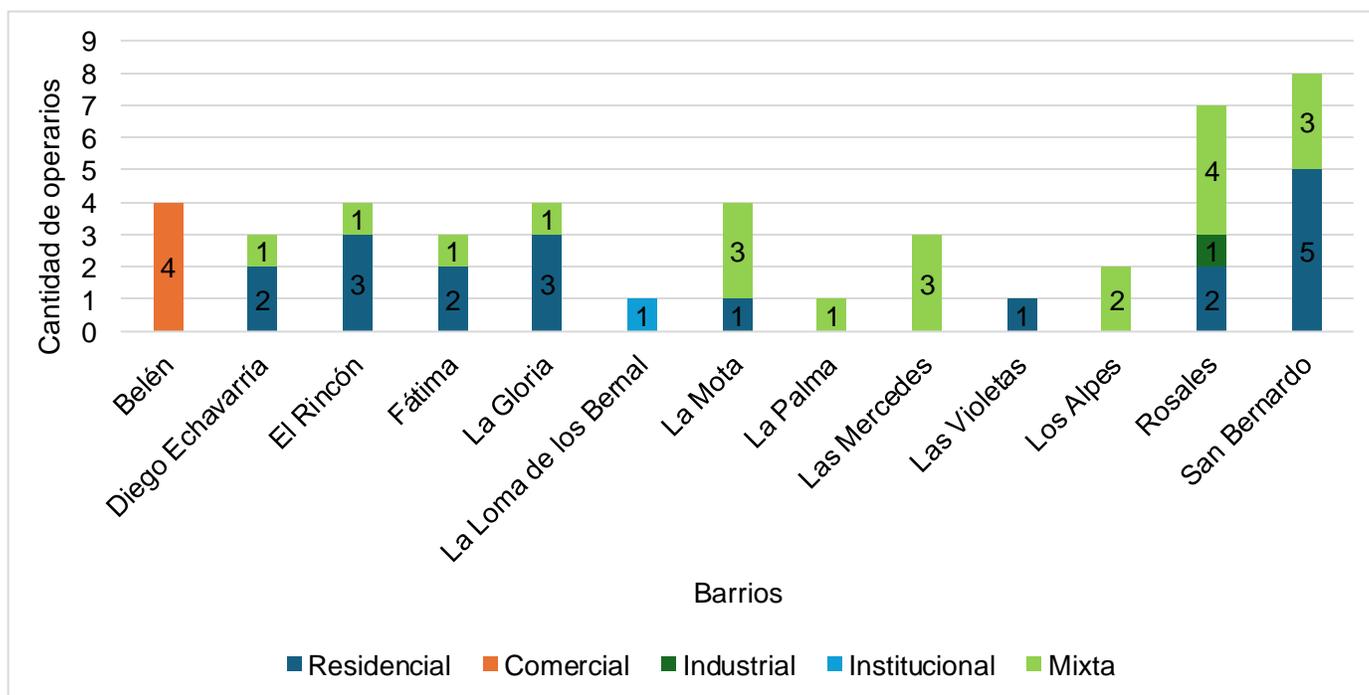
Con respecto al tiempo de desempeñando en el cargo de operario de barrido se encontró que varía entre 1 y 252 meses (21 años), con un valor medio de 55,6 meses, es decir, aproximadamente 4 años y 5 meses. De esta variable se destaca que el 71,1 % de los

encuestados se encontraba en el rango entre 0 a 5 años de servicio como operario de barrido y solo el 11,1 % se había desempeñado más de 11 años en el oficio.

Específicamente, para la zona evaluada el tiempo de servicio de los operarios de barrido fluctuó entre 0,50 meses (15 días) y 168 meses (14 años), con un valor medio del tiempo de antigüedad 21,4 meses (1 año y 7 meses aproximadamente). Se resalta que, el 60% de los trabajadores encuestados llevan menos de un año laborando en la ruta actual.

Las rutas de los operarios de barrido seleccionadas cubren 13 de los 21 barrios de la comuna de Belén. Las mayores frecuencias se presentaron en los barrios San Bernardo con un 17,8 % y Rosales con un 15,5 %. De acuerdo con los participantes en la encuesta, los recorridos en la comuna de Belén se hacen predominante en zonas mixtas con un 44,4 % (conjunto de áreas residenciales y comerciales), residenciales con un 42,2% y representando en menor medida zonas institucionales e industriales, así como se observa en la Figura 13.

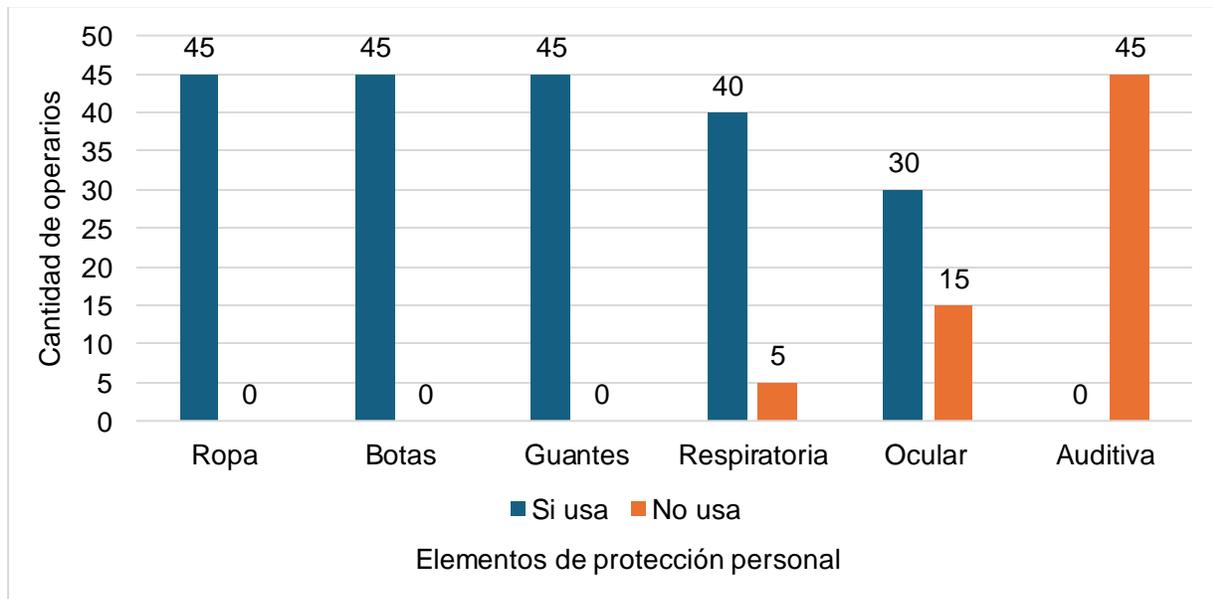
Figura 13. Tipo de zona según el barrio en el que desarrollan sus actividades.



El 71,1% de la población encuestada expresó que hay un flujo vehicular alto en las zonas en las cuales hacen sus recorridos. Además, un 66,7 % de los participantes manifestaron que hay presencia de humo de cigarrillo en el entorno en el que laboran.

Según el uso de elementos de protección personal representado en la Figura 14, el 100% de los operarios de barrido usaban ropa de protección (camisa manga larga, pantalón y gorra), guantes de badana y botas de seguridad; el 88 % utilizaban protección respiratoria (tapabocas de tela), el 66,7 % protección ocular (gafas de seguridad) y ninguno utilizaba protección auditiva.

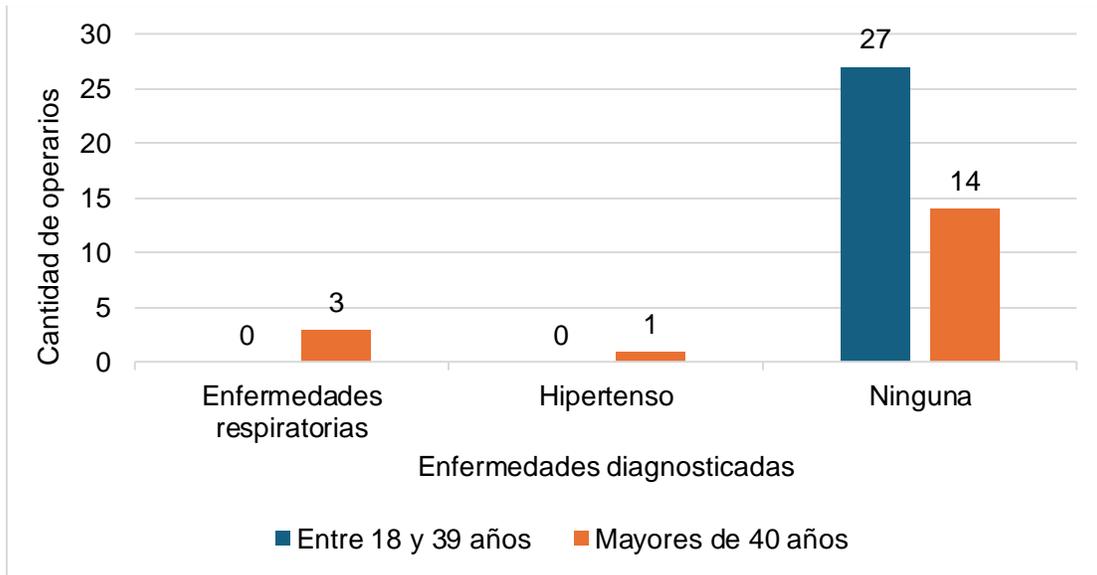
Figura 14. Distribución de uso de elementos de protección personal por la población encuestada.



8.1.3 Morbilidad diagnosticada

Los resultados de la encuesta para la morbilidad sentida, como se puede observar en la Figura 15, indicaron que el 6.7% de los operarios de barrido encuestados padece de enfermedades respiratorias y el 2.2% sufren de hipertensión arterial, destacando que las personas que indicaron sufrir de estas enfermedades eran mayores de 40 años. Adicionalmente, el 4.4% indica haber estado hospitalizado en los últimos seis meses debido a infección urinaria y trombosis venosa.

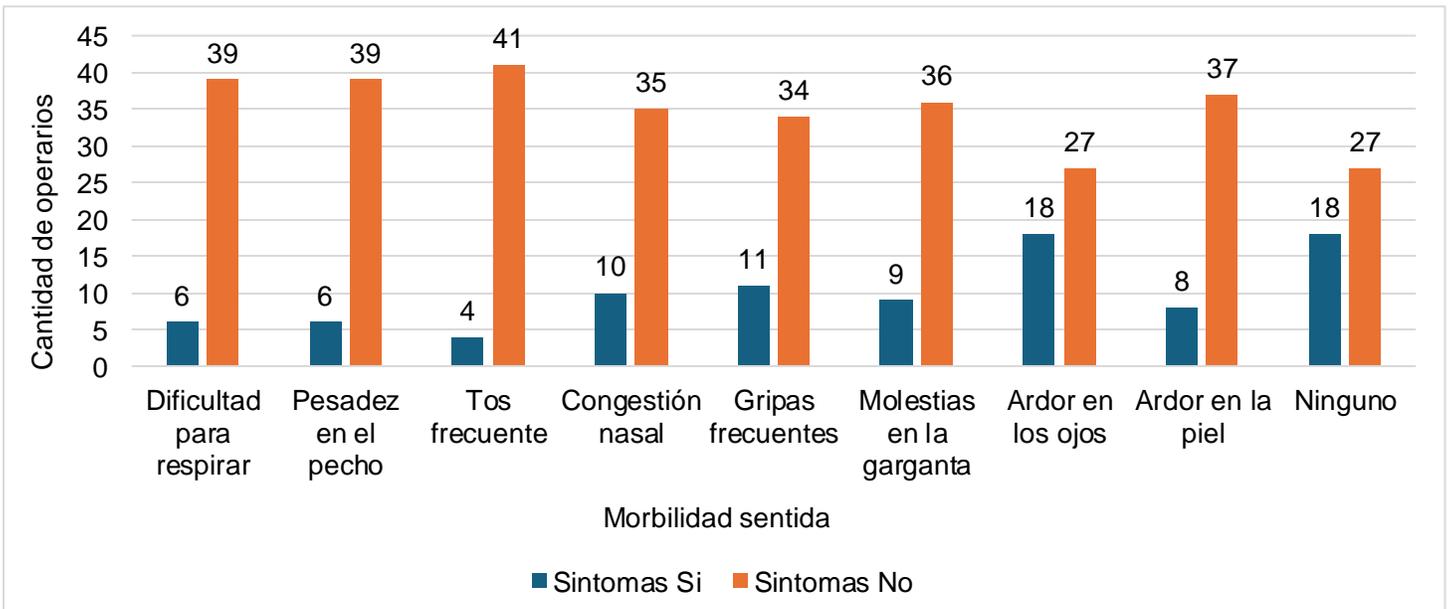
Figura 15. Enfermedades diagnosticadas en población mayor y menor de 40 años.



8.1.4 Morbilidad sentida

Con relación a la sintomatología asociada posiblemente a la exposición de la calidad del aire, el 40% de las personas manifestaron no haber sufrido ningún síntoma, el 48,9% presentaron más de un síntoma y un 11,1% (5) más de tres síntomas. Los síntomas más comunes fueron el ardor en los ojos (18), gripas frecuentes (11) y congestión nasal (10). (Ver Figura 16)

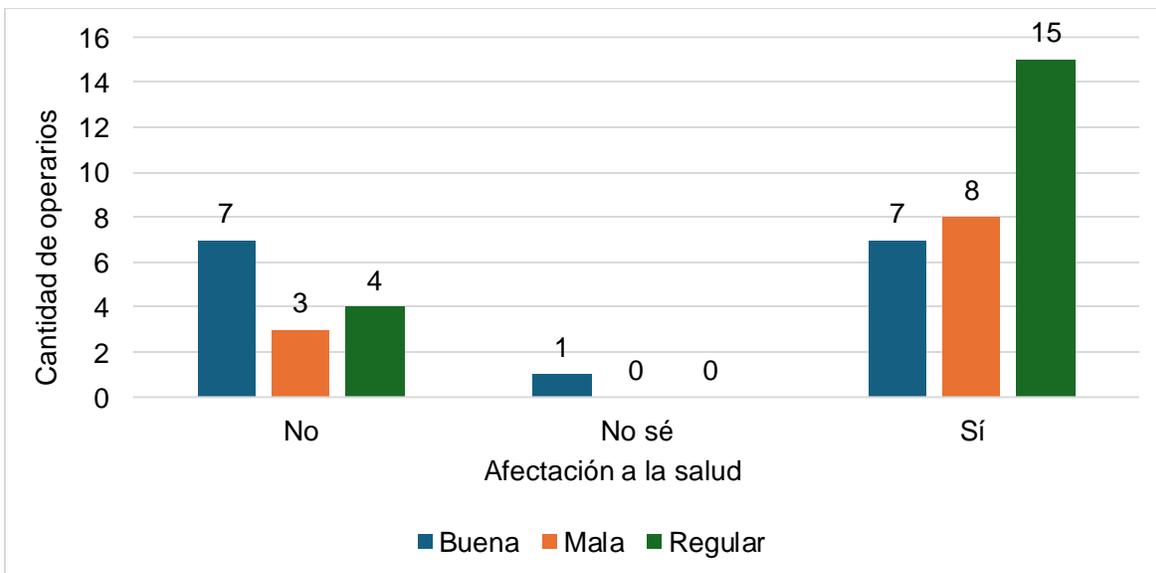
Figura 16. Distribución de síntomas manifestados por la población encuestada.



8.1.5 Percepción personal sobre la calidad del aire

Frente a la percepción del estado de la calidad del aire en el entorno, el 42,2% de los encuestados manifestó que era regular, 33,3% buena y 24,4% mala. Adicionalmente, un 66,7% asegura que la contaminación afecta su salud, el 31,1 % no lo percibe de esta manera y el 2,2% no sabe; en la figura 17 se visualizan los valores descritos.

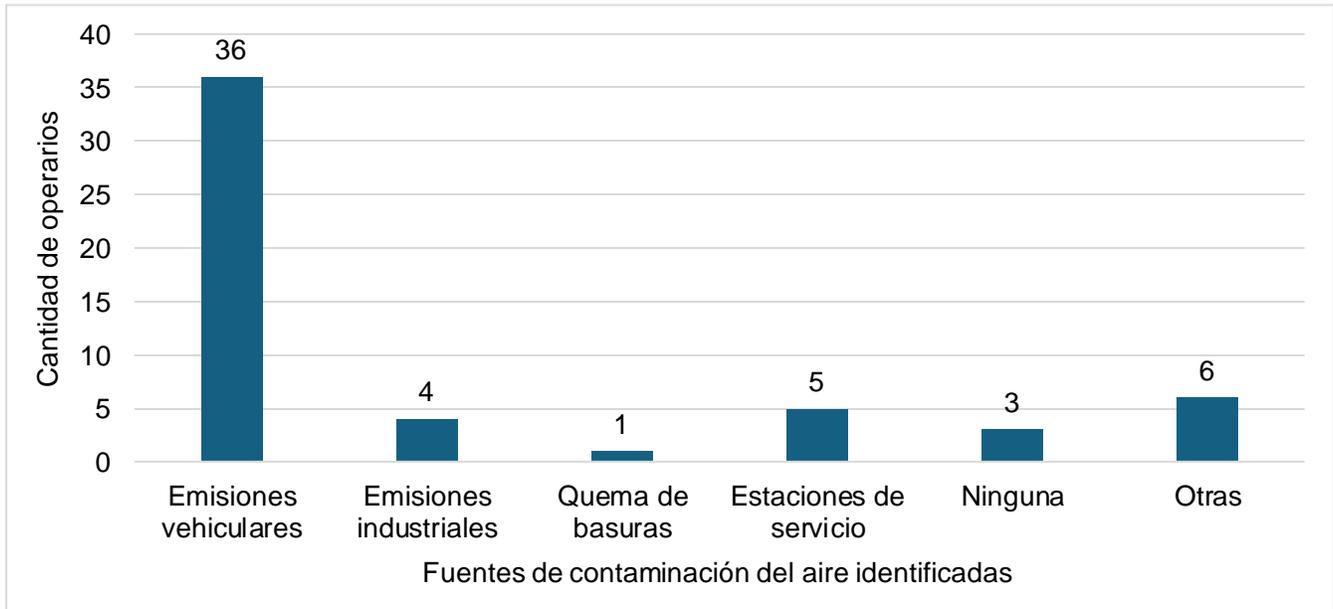
Figura 17. Estado de la calidad del aire en el entorno laboral y posible afectación a la salud.



Un 53,3% de los operarios encuestados considera que cuando se tienen contingencias de calidad del aire en la ciudad se aplican medidas específicas de protección, entre estas se destacó, la inducción y capacitaciones periódicas con respecto al uso de los elementos de protección personal.

Respecto a las fuentes de contaminación del aire que reconocen los operarios en su recorrido, las más mencionadas fueron las emisiones vehiculares (36 personas) y las estaciones de servicio de combustible (5 personas); 6 personas señalaron otras fuentes como quemas de leña y el humo de cigarrillo; en la figura 18 se detallan los valores respecto a las fuentes de contaminación.

Figura 18. Distribución de fuentes de contaminación del aire identificadas por la población encuestada.



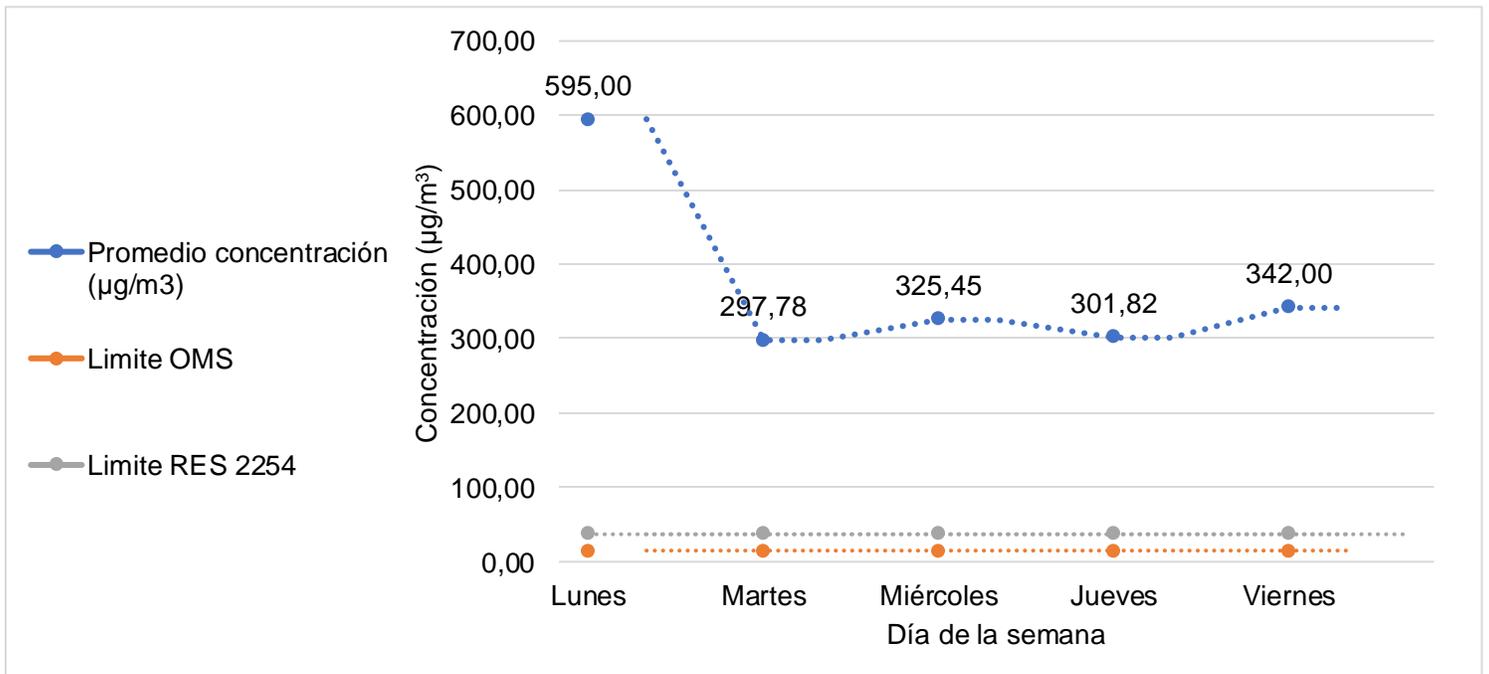
8.2 Objetivo específico 2

En total se realizaron 45 mediciones de exposición personal a material particulado respirable entre la cuarta semana de agosto y la tercera semana de septiembre del año 2023, de lunes a viernes, entre las 6:00 y las 14.00 horas, con una media de 6 horas. La concentración media de material particulado respirable alcanzó $341,78 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con valores que oscilaron entre 130 y $1390 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Es importante resaltar que el 57,8% de los resultados fue inferior al valor promedio y el 42,2% fue superior.

Al realizar un análisis con base en la estimación de exposición en un tiempo de 24 horas, se encontró que el 100% de los resultados superó el límite recomendado por la Organización Mundial de la Salud establecido en $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y el límite definido en la normativa colombiana (Resolución 2254 de 2017) definido en $37 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Como se observa en la Figura 19, los valores medios de la concentración de material particulado por día muestran que los mayores niveles se registraron el lunes ($595 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y los menores el martes ($297,78 \mu\text{g}/\text{m}^3$). No obstante, es importante resaltar que la concentración de material particulado respirable solo se midió un lunes en el barrio San Bernardo, considerado el más contaminado con material particulado y, por tanto, esta es posiblemente la explicación de la mayor concentración el lunes.

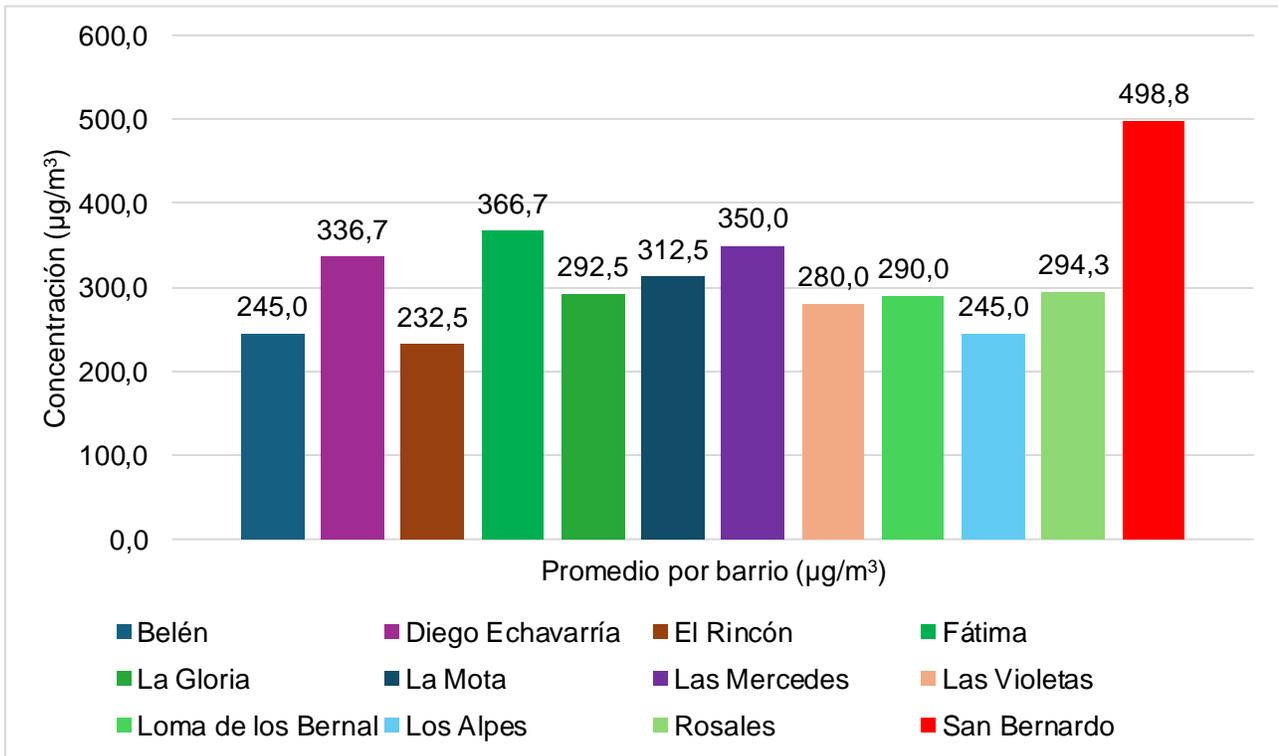
Figura 19. Promedio concentración por día de la semana.



Como se infiere de la Figura 20, en los 12 barrios evaluados la concentración de material particulado alcanzó un promedio de 311,99 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Se destaca que los valores máximos son de 498,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 366,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 350,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y corresponden a los barrios San Bernardo, Fátima y Las Mercedes, respectivamente.

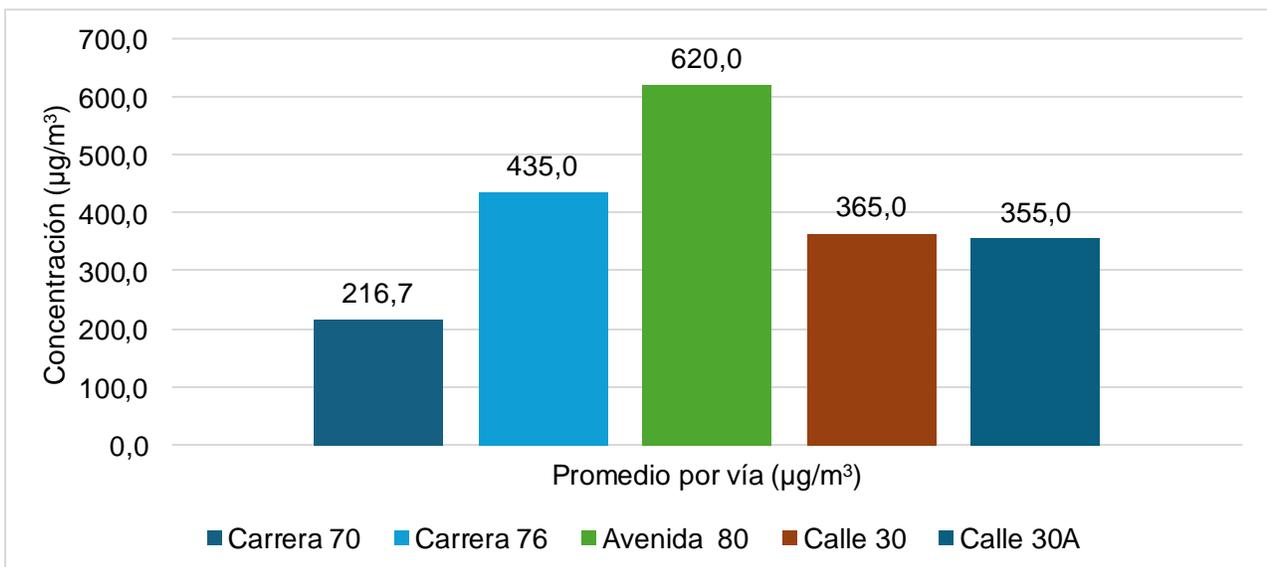
En San Bernardo y Fátima, estos valores se presentaron debido posiblemente a su ubicación en el área de influencia de la Avenida 80, las Carreras 70 y 76 y las Calles 30 y 30a, cinco vías con un alto flujo vehicular. En el caso de Las Mercedes, este valor se pudo haber presentado porque en este barrio se ubica la vía principal hacia las ladrilleras, por lo tanto, hay un alto tránsito de vehículos de carga pesada.

Figura 20. Promedio concentración por barrio para el tiempo muestreado.



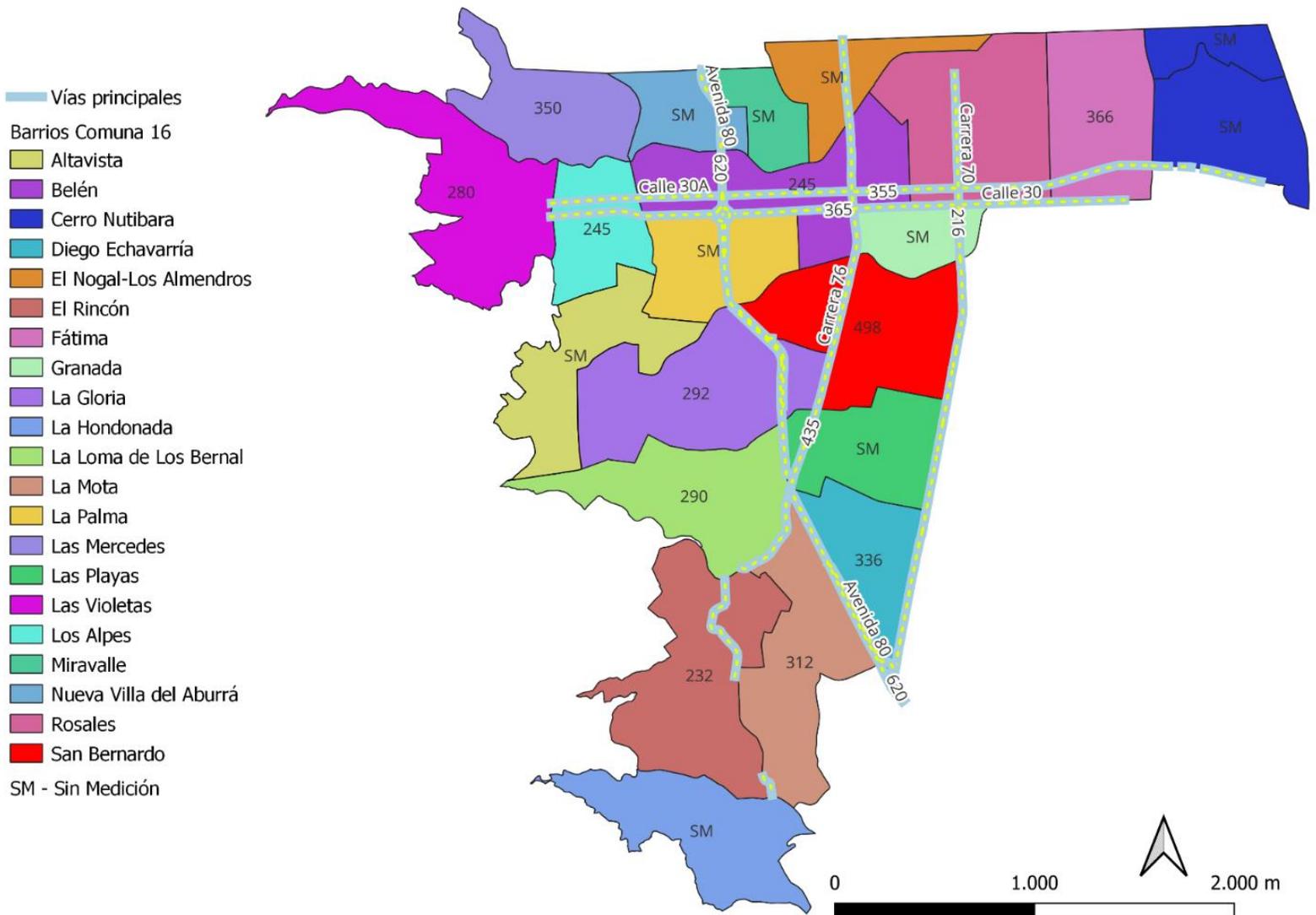
En la figura 21 se observan los resultados de las evaluaciones de niveles de exposición a material particulado respirable realizados en los operarios que ejecutaron sus actividades laborales en las 5 vías principales de la comuna de Belén, las cuales indicaron una concentración media de 398,33 µg/m³, con un valor mínimo de 216,67 µg/m³ en la Carrera 70 y un máximo de 620,00 µg/m³ en la Avenida 80.

Figura 21. Promedio concentración por vías principales para el tiempo muestreado.



En la Figura 22 se ilustra la distribución espacial del promedio de las concentraciones medias del material particulado en la comuna 16 (Belén). La sigla SM significa que no se realizó muestreo.

Figura 22. Mapa comuna 16 con promedio de concentración por barrio y vía principal.



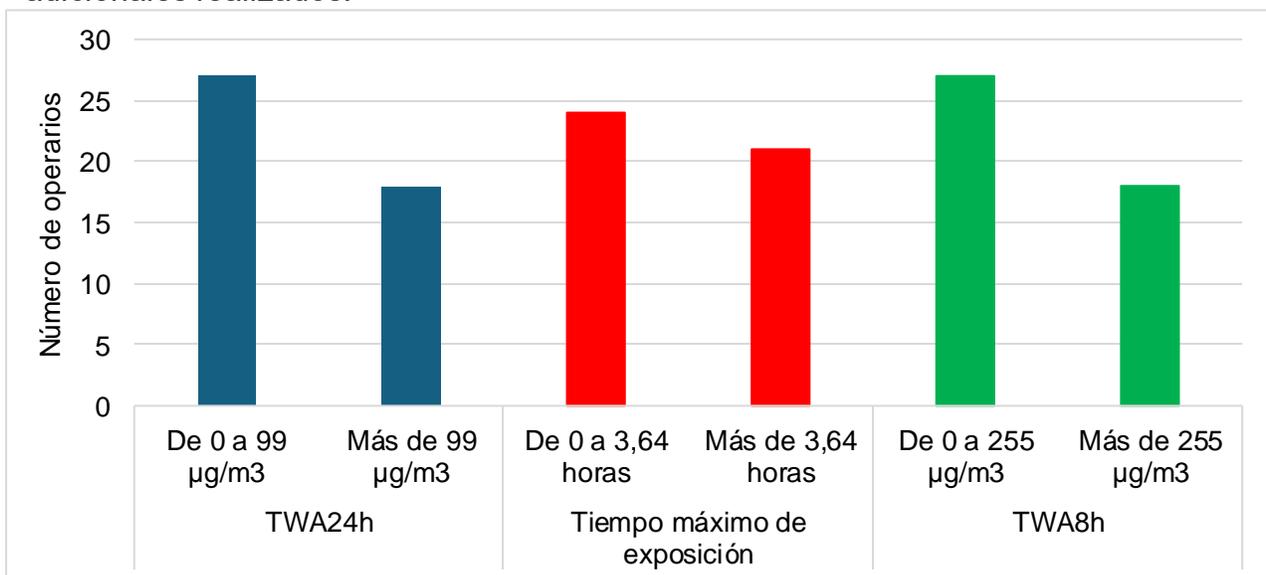
Al realizar el cálculo del tiempo máximo de exposición al que puede estar expuesto un operario de barrido para superar los límites recomendados por la OMS, el cual es de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para un periodo de exposición de 24 horas, se encontró que en promedio un operario al laborar 3,64 horas alcanza este límite.

Para 8 horas de exposición ($\text{TWA}_{8\text{h}}$) se calculó una concentración promedio de material particulado respirable de $255,60 \mu\text{g}/\text{m}^3$, un valor mínimo de $97,50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y uno máximo de $1042,50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Estas cifras no superaron en ningún caso el valor límite umbral de la ACGIH el cual es $3000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para un tiempo de exposición laboral de 8 horas, que es el promedio de tiempo que una persona realiza actividades laborales diariamente.

El promedio de concentración de material particulado respirable para 24 horas ($\text{TWA}_{24\text{h}}$) de las 45 muestras analizadas alcanzó un nivel de exposición de $99,90 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con valores entre $47,20$ y $362,20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, donde el 60% de los resultados de las evaluaciones realizadas estuvieron por debajo de esta media. Sin embargo, el 100% de las estimaciones superó los límites recomendados por la Organización Mundial de la Salud, que corresponde a $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y lo estipulado en la norma nacional de la calidad del aire, que indica un nivel de inmisión de $37 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

En la figura 23 se visualizan los valores detallados anteriormente para los calculos adicionales realizados.

Figura 23. Operarios de barrido por encima y debajo del valor promedio para los cálculos adicionales realizados.



8.3 Objetivo específico 3

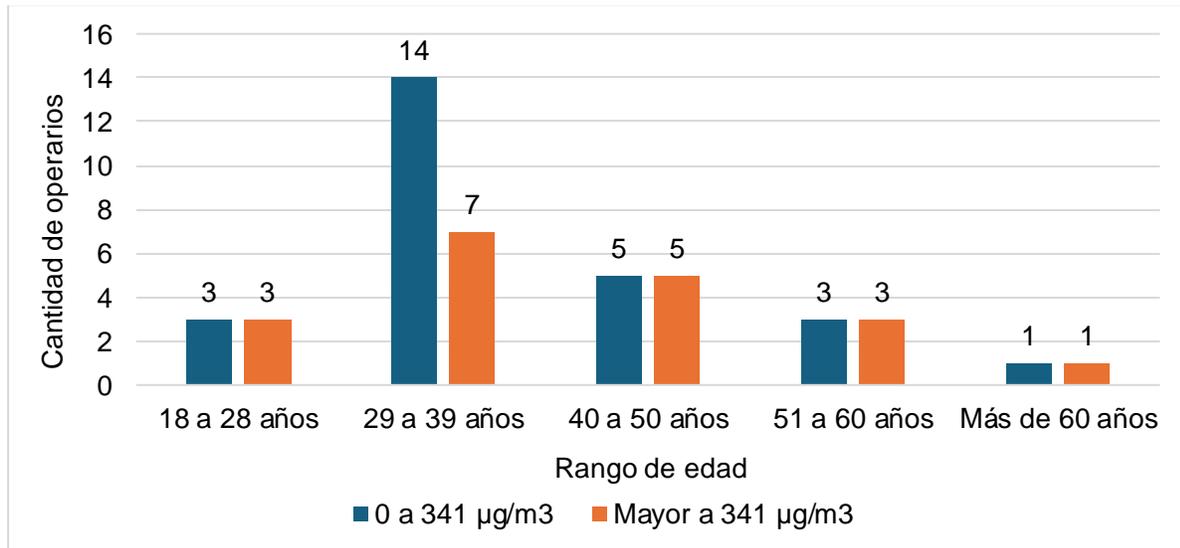
Cabe aclarar que este objetivo no tiene un alcance que permita evaluar cómo los niveles de exposición encontrados podrían clasificarse en categorías para determinar los niveles de riesgo a la salud de los operarios evaluados según los niveles de concentración hallados y la encuesta de percepción, en especial porque las mediciones realizadas fueron con base en métodos de muestreo y análisis para exposición a nivel ocupacional y no empleando metodologías ambientales, con base en las cuales se operan los Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire y se determinan niveles de inmisión para ser comparados con los límites máximos permisibles estipulados en la normativa ambiental colombiana y lo recomendado por la OMS. No obstante, en algunos casos se comparará con los límites anteriormente mencionados, con el fin de tener una referencia de cómo los niveles de exposición encontrados pueden estar alertando sobre la exposición al material particulado del grupo población evaluado en la zona de estudio definida.

Por lo anterior, al analizar el cruce entre las variables de concentración de material particulado respirable y la percepción sobre la calidad del aire del entorno y su salud, se obtuvieron los siguientes resultados, teniendo que analizó la información con base en el valor medio ($341 \mu\text{g}/\text{m}^3$) evaluado.

Al relacionar el nivel de exposición de los operarios de barrido al material particulado respirable (concentración) y los rangos de edad, se encontró que en el rango de edad de 29 a 39 años el 66,7% de los operarios de barrido estuvieron expuestos a una concentración inferior al promedio ($341 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Para el resto de los rangos de edad no se encontraron diferencias en la proporción de operarios de barrido expuestos a niveles superiores e inferiores al promedio de la concentración del material particulado; estos datos se detallan en la Figura 24.

De los operarios evaluados solo dos personas pertenecían al grupo poblacional mayor a 60 años, los cuales hacen parte de población catalogada como grupos sensibles a la contaminación del aire. La exposición a material particulado respirable de estas personas alcanzó valores de $380 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $280 \mu\text{g}/\text{m}^3$, valor que permite tener una referencia de que posiblemente otras personas que pertenezcan a este grupo de edad o a un grupo población catalogado como sensible y permanezcan periodos de exposición similares al aire libre, podrían presentar mayor riesgo de padecer enfermedades asociadas a la contaminación del aire.

Figura 24. Distribución de rangos de edad por encima y por debajo de la concentración promedio de material particulado respirable.



Según la percepción de los operarios de barrido con relación a la dinámica del flujo vehicular, 32 personas consideraron que es alto, de los cuales el 50% estuvieron por encima de la media de concentración. Además, solo dos operarios consideraron que el flujo vehicular en su zona era bajo, de estos, un operario estuvo por encima de la media de concentración (Ver Figura 25).

En la comuna de Belén el uso del suelo es variado, es decir, se encuentra el uso comercial, industrial, institucional, residencial y mixto. La mayor parte de la población de operarios de barrido se encontró en una zona de uso mixto, residencial y comercial principalmente, con un 24,4% de la población expuesta a niveles de material particulado superiores al valor promedio ($341 \mu\text{g}/\text{m}^3$), en el caso de la zona residencial la exposición a este contaminante también estuvo por encima del valor promedio de las mediciones. Para todos los casos se asumen concentraciones de material particulado posiblemente influenciadas por el flujo vehicular alto y medio que perciben los operarios en sus zonas de trabajo.

Figura 25. Percepción de flujo vehicular en la zona por encima y por debajo de la concentración promedio de material particulado respirable.

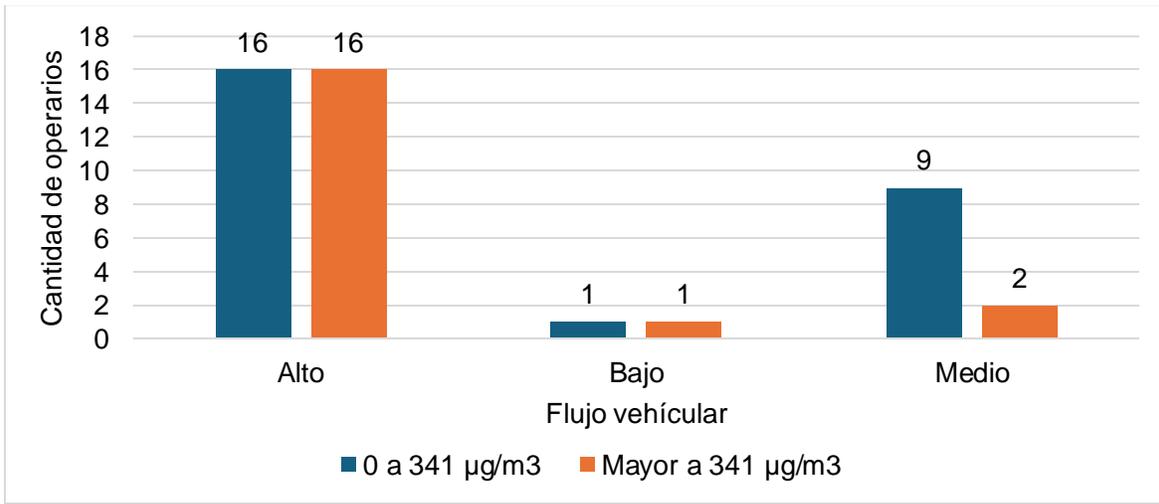
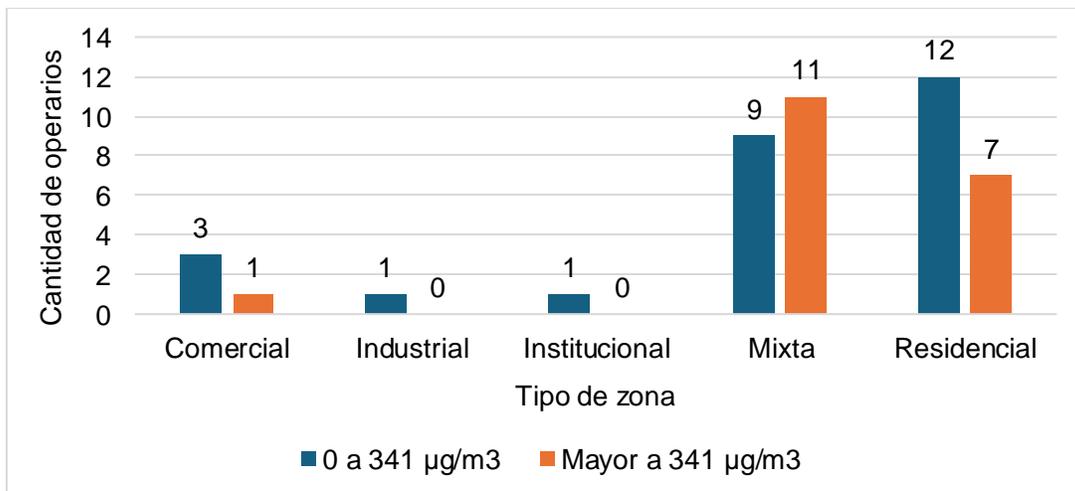
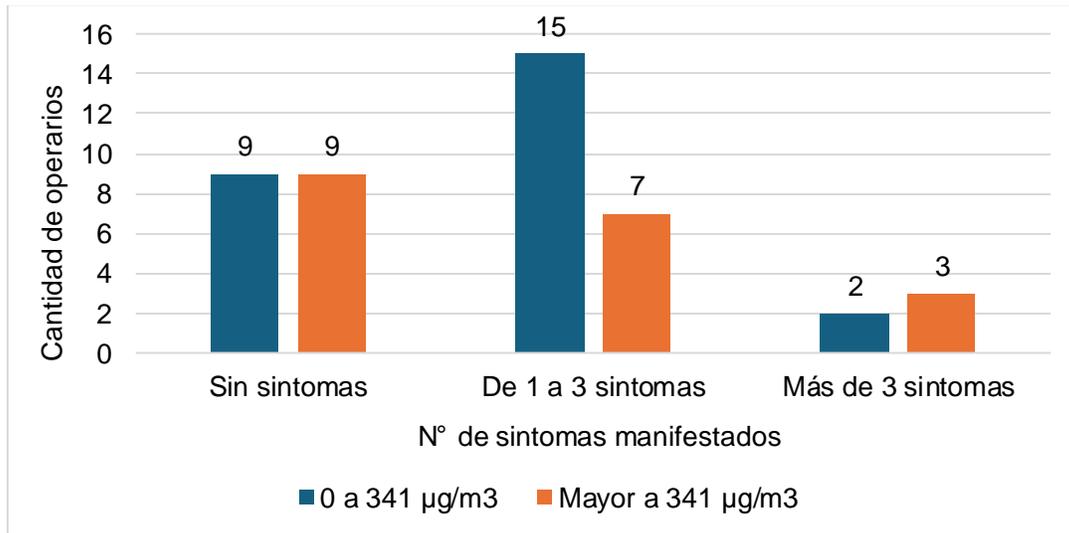


Figura 26. Tipo de zona donde labora por encima y por debajo de la concentración promedio de material particulado respirable.



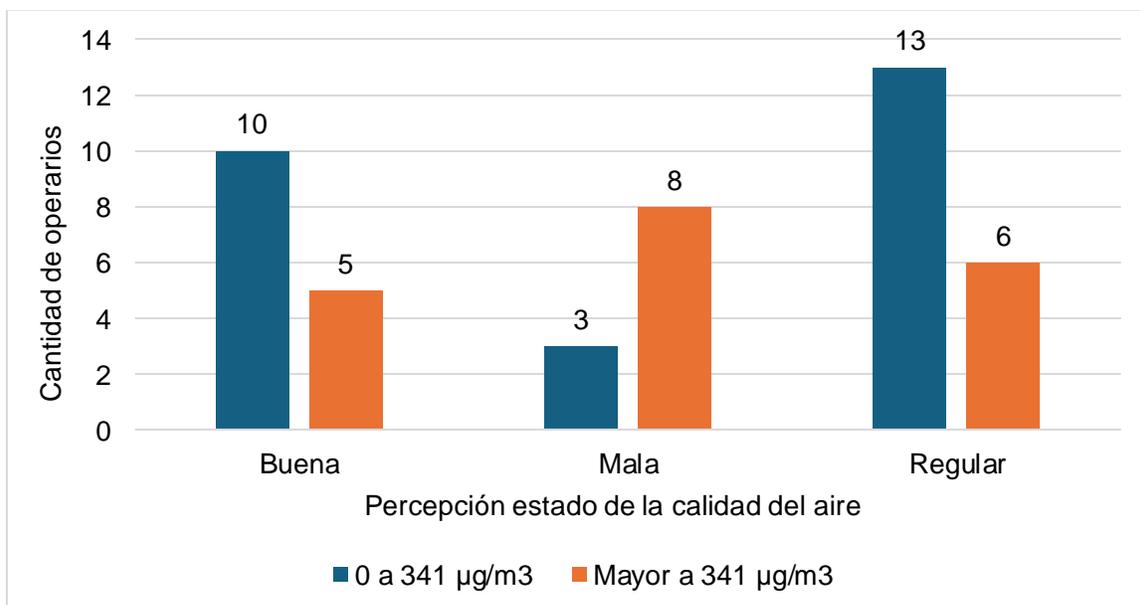
Los resultados del estudio se basaron en mediciones de exposición personal para periodos laborales de alrededor de 6 horas en ambientes exteriores, permitiendo observar que los niveles de exposición registrados en todos los operarios evaluados se encuentran por encima de los límites normativos, tanto nacionales como los recomendados por la OMS, donde 27 de los operarios encuestados, manifestaron haber presentado por lo menos un síntoma como ardor en los ojos, congestión nasal, gripas frecuentes y molestias en la garganta, sintomatología posiblemente asociada a los niveles de inmisión de material particulado.

Figura 27. Sintomatología presentada por los operarios con relación a la concentración promedio de material particulado respirable.



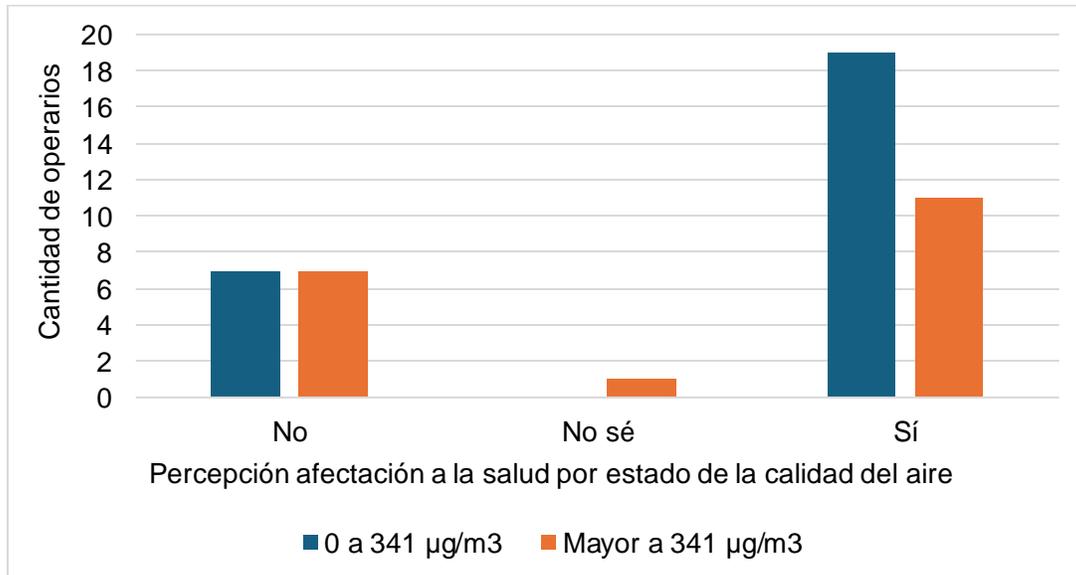
De acuerdo con la percepción personal que tenían los operarios sobre la calidad del aire, cinco de los 15 operarios de barrido que consideraban que en su sector la calidad del aire era buena, estuvieron expuestos a concentraciones de material particulado respirable superiores al valor medio. En contraste, de 11 que consideraron que la calidad del aire era mala, 3 estuvieron expuestos a concentraciones inferiores a 341 µg/m³; en la figura 28 se visualizan los datos descritos.

Figura 28. Percepción de la calidad del aire en el entorno laboral por encima y por debajo de la concentración promedio de material particulado respirable.



Con relación a la percepción de los operarios de barrido respecto a si la calidad del aire afectaba su salud, se encontró que 66,7 % de los operarios consideran que dicha exposición si afecta su salud, el valor restante considera que no hay una afectación de su salud; no obstante, para todos los resultados los niveles de exposición están por encima de los 37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, nivel de inmisión a material particulado $\text{PM}_{2.5}$ definido por la normativa colombiana. (Ver Figura 29)

Figura 29. Percepción de afectaciones a la salud derivadas de la contaminación del aire por encima y por debajo de la concentración promedio de material particulado respirable.



En la tabla 9 se sintetiza la información del cruce de variables analizadas para describir la posible relación entre las concentraciones de material particulado respirable a la que están expuestos los operarios de barrido y la percepción sobre calidad del aire del entorno y su salud.

Tabla 9. Resumen de las variables cruzadas.

Variable	Rango	Rango de concentración				Total
		0 a 341 µg/m ³	Porcentaje	Mayor a 341 µg/m ³	Porcentaje	
Edad	18 a 28 años	3	6,7	3	6,7	13,3
	29 a 39 años	14	31,1	7	15,6	46,7
	40 a 50 años	5	11,1	5	11,1	22,2
	51 a 60 años	3	6,7	3	6,7	13,3
	Más de 60 años	1	2,2	1	2,2	4,4
¿Cómo es el flujo vehicular durante su recorrido laboral?	Alto	16	35,6	16	35,6	71,1
	Bajo	1	2,2	1	2,2	4,4
	Medio	9	20,0	2	4,4	24,4
¿Cuál es el tipo de zona en la que realiza sus actividades laborales?	Comercial	3	6,7	1	2,2	8,9
	Industrial	1	2,2	0	0,0	2,2
	Institucional	1	2,2	0	0,0	2,2
	Mixta	9	20,0	11	24,4	44,4
	Residencial	12	26,7	7	15,6	42,2
Cantidad de síntomas	Sin síntomas	9	20,0	9	20,0	40,0
	De 1 a 3 síntomas	15	33,3	7	15,6	48,9
	Más de 3 síntomas	2	4,4	3	6,7	11,1
¿Cómo considera que es la calidad del aire en su entorno laboral?	Buena	10	22,2	5	11,1	33,3
	Mala	3	6,7	8	17,8	24,4
	Regular	13	28,9	6	13,3	42,2
¿Considera que durante su jornada laboral, la contaminación del aire afecta su salud?	No	7	15,6	7	15,6	31,1
	No sé	0	0,0	1	2,2	2,2
	Sí	19	42,2	11	24,4	66,7

9. Discusión

9.1 Comparación con otros estudios sobre percepción personal asociada a la calidad del aire

Al analizar otros estudios nacionales de percepción personal sobre la calidad del aire, como la investigación “Percepción ciudadana sobre el impacto de la contaminación atmosférica en salud y calidad de vida: estudio piloto” realizado por Ariza y colaboradores (2013) (73), en comparación con el presente estudio, pese a que no es el mismo grupo poblacional pero si percepciones de la población en general, se destaca que el mayor porcentaje de la población bogotana percibe como mala la calidad del aire de la ciudad de Bogotá, diferente a lo reportado en este estudio donde la percepción de los operarios de barrido que está representada principalmente por considerar que están expuestos a una calidad del aire buena y regular.

Tabla 10. Comparación percepción del estado de la calidad del aire con otros estudios.

Percepción respecto a la calidad del aire			
	Buena	Regular	Mala
Operarios de barrido	33,3%	42,2%	24,4%
Bogotanos	6,5%	12,5%	81,0%

Adicional a este estudio, se encontró que en el 2020 se realizó la investigación sobre “Percepciones de los habitantes del municipio de Sabaneta frente a los cambios en la calidad del aire y su influencia en la salud pública entre los años 2015-2020” llevado a cabo por Vahos Monsalve (74). En la tabla 11 se representa las fuentes de contaminación de la calidad del aire identificadas en los tres estudios mencionados, encontrándose que coinciden en que la principal fuente de contaminación en las zonas de estudio analizadas para cada investigación está asociada a las emisiones del parque automotor, lo cual respalda lo indicado en el CONPES 3943 de 2018 donde se presenta que la contaminación del aire en Colombia está representada principalmente por las emisiones del parque automotor.

Tabla 11. Comparación de fuentes de contaminación observadas con otros estudios.

Fuentes de contaminación			
	Emisiones vehiculares	Emisiones industriales	Quema de basuras
Operarios de barrido	80,0%	8,9%	2,2%

Fuentes de contaminación			
	Emisiones vehiculares	Emisiones industriales	Quema de basuras
Bogotanos	53,0%	12,5%	34,5%
Sabaneteños	100,0%	25,0%	---

9.2 Comparación otros estudios sobre exposición a material particulado respirable

Al comparar los resultados de las concentraciones de material particulado respirable de la presente investigación con otros estudios realizados en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, como el de Ramírez Vélez realizado en motociclistas (2013) y el de Segura Tirado realizado en venteros informales (2017), podemos observar la Tabla 12, algunos aspectos analizados en los tres estudios.

Tabla 12. Comparación de resultados con otros estudios sobre medición de exposición personal a material particulado respirable.

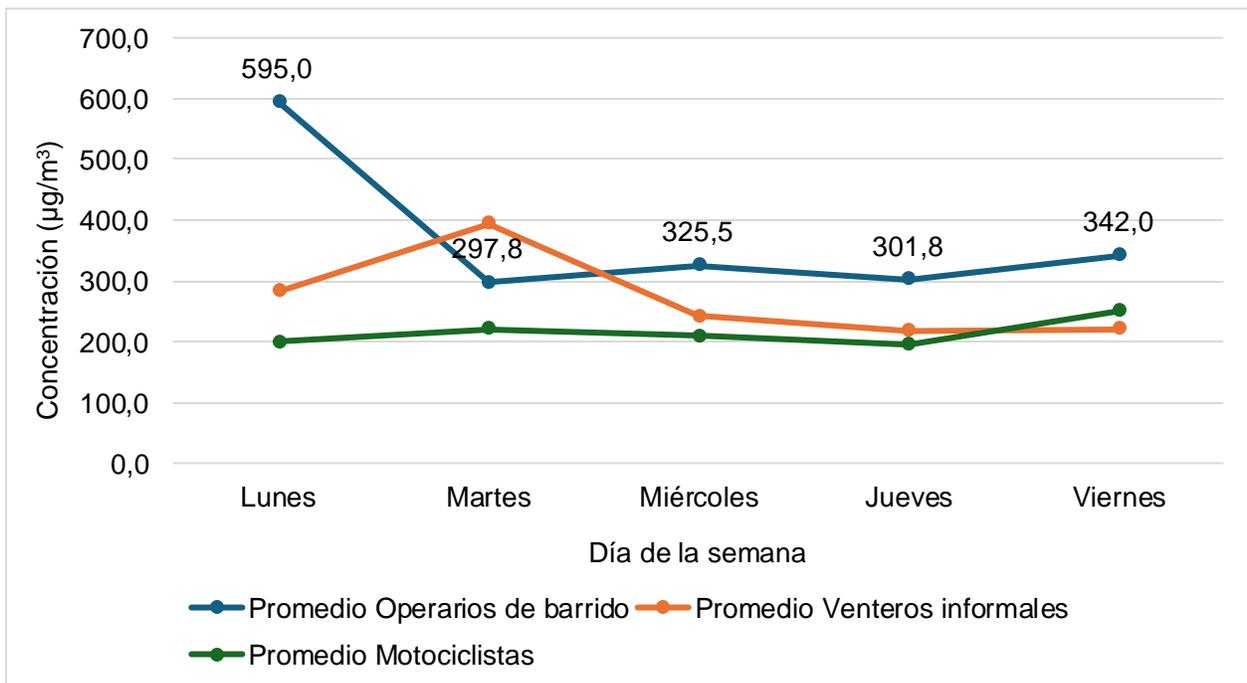
Población de estudio	Año	Lugar de estudio	Promedio concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Motociclistas	2013	Zona centro de Medellín	216
Venteros informales	2017	Avenida Oriental	241,47
Operarios de barrido	2023	Comuna 16, Belén	341,78

De acuerdo con lo anterior, se destaca que, aunque los estudios fueron realizados en grupos poblacionales y áreas de estudios diferentes, todas las zonas se encuentran ubicadas dentro del Área Metropolitana del Valle de Aburrá y en los tres casos la población evaluada realizaba actividades laborales al aire libre.

Analizando la concentración promedio de exposición a material particulado de cada estudio, se puede observar que esta ha ido en aumento, aproximadamente en un 63,19 % con relación a lo reportado en el año 2013, lo cual posiblemente ha estado influenciado por el crecimiento poblacional en el Valle de Aburrá, el cual pasó de 2.320.791 personas en el 2015 a 2.653.739 en el año 2023 (75); y a su vez el crecimiento exponencial del parque automotor, el cual creció entre los años 2013 y 2018, con alrededor de 409.035 vehículos nuevos registrados(76).

Adicionalmente, al comparar las concentraciones para los días de la semana en los que se realizaron los muestreos, se encontraron similitudes para los miércoles y jueves en los tres estudios donde se mantuvo una tendencia y no tuvieron un cambio representativo entre estos días, también en los estudios con motociclistas y operarios de barrido se nota un incremento en la concentración los viernes. Únicamente en el estudio con los operarios de barrido se presentó la mayor concentración el lunes, debido a que solo se midió el material particulado respirable en el barrio San Bernardo, que presenta con un alto flujo vehicular (Ver Figura 30).

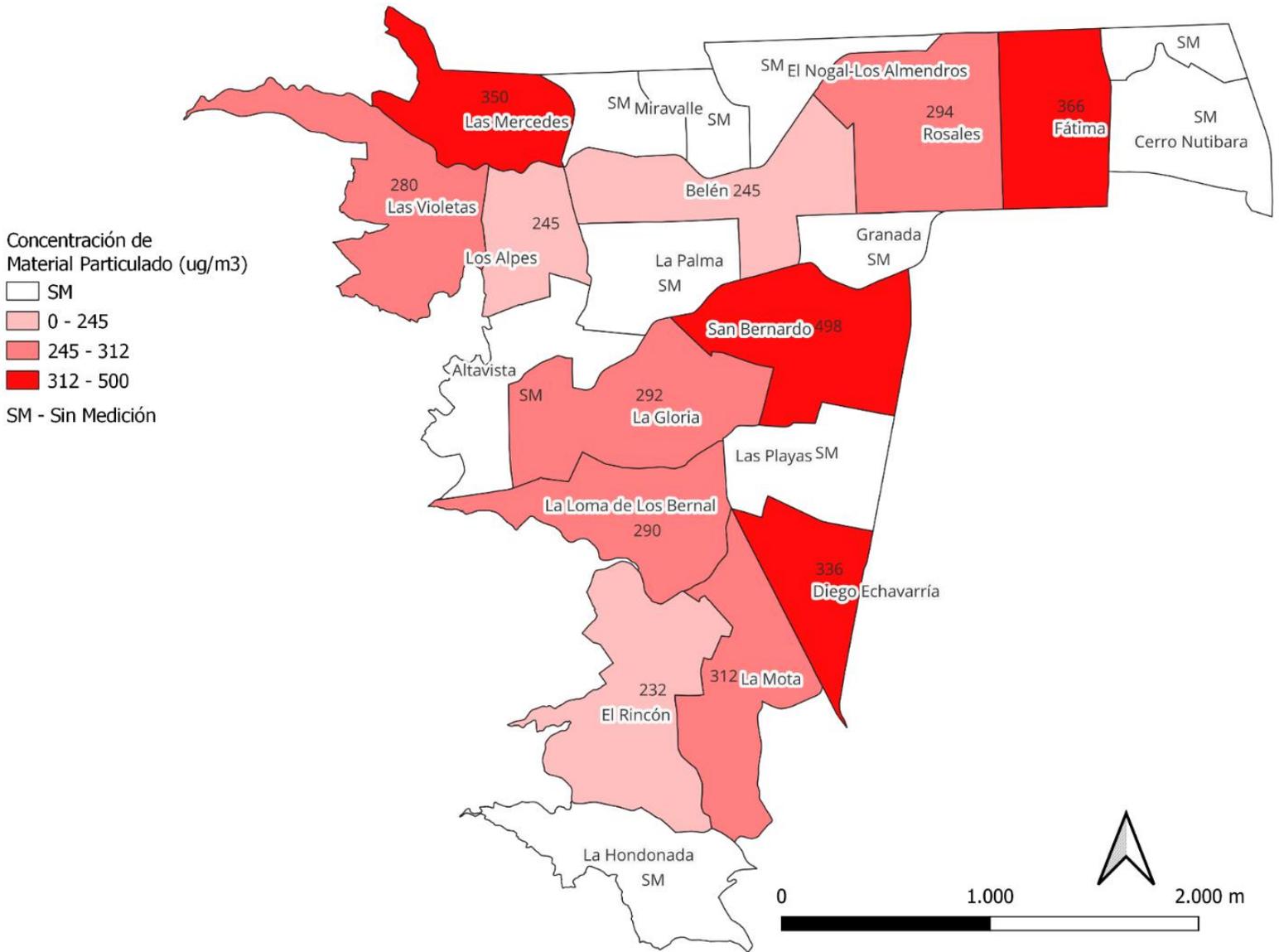
Figura 30. Comparación de promedios de concentración de material particulado respirable con otros estudios.



En el estudio sobre carga de la enfermedad, costos derivados y geolocalización de la morbilidad, atribuibles a la contaminación por PM_{2.5} en Medellín 2010-2016 desarrollado por Grisales Romero y colaboradores se encontró que los mayores niveles de morbilidad se registraron, en los barrios San Bernardo, Las Playas y El Rincón de la comuna 16, Belén (77). De esta forma, se reconoce San Bernardo como el barrio de mayor concentración de material particulado respirable.

La figura 31 esquematiza la distribución de la concentración de material particulado en Belén por rangos, resaltando que la identificación de SM, son aquellos sectores donde no se realizó medición.

Figura 31. Distribución por rangos de concentración de material particulado respirable en la comuna 16, Belén.



9.3 Comparación entre exposición personal a material particulado respirable y normativa nacional de calidad del aire

Al analizar los valores de las concentraciones obtenidas en el muestreo personal de material particulado respirable, se encontró que el 100% de las evaluaciones realizadas en los operarios de barrido sobrepasaron los límites establecidos por la Resolución 2254 de 2017, es decir, $37 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para tiempos de exposición de 24 horas.

Pese a que las metodologías de medición son diferentes para evaluar la exposición personal como se aplicó en este estudio, con relación a los monitoreos de calidad del aire o niveles de inmisión empleados para analizar el nivel de cumplimiento de la normativa colombiana y las recomendaciones de la OMS, consideramos que las evaluaciones realizadas directamente en las personas expuestas a las condiciones ambientales de los diferentes entornos, nos permiten tener una aproximación más cercana de esos niveles de inmisión a los que se exponen ciertos grupos poblacionales, en especial aquellos que pasan la mayor parte de su tiempo desarrollando actividades en entornos exteriores, donde ese aire que respiran no solo tiene presencia de material particulado sino de otros contaminantes criterios que también puede afectar la salud humana.

Adicionalmente, analizando los rangos de concentración para declaratoria de niveles de prevención, alerta o emergencia establecidos en la Resolución 2254 de 2017 y que se presentan en la siguiente tabla, con relación a la estimación de las concentraciones halladas para periodos de exposición de 24 horas, es decir el $\text{TWA}_{24\text{h}}$, se encontró que el 8,9% de las mediciones clasificaron en el nivel de prevención, el 84,4% en el nivel de alerta y el 6,7% en el nivel de emergencia. Se tiene claridad que para estas declaraciones se tiene una serie de criterios adicionales con base en el análisis de datos y que las decisiones no son tomadas basados en el análisis de un solo reporte; sin embargo, se realiza ese análisis comparativo con la finalidad de cuestionar cómo las personas posiblemente están expuestas en su día a día a unas concentraciones superiores a las reportadas por los equipos de medición que monitorean a nivel ambiental.

Tabla 13. Rangos de concentración para declaratoria de niveles de prevención, alerta o emergencia

Contaminante	Tiempo de exposición	Prevención	Alerta	Emergencia
$\text{PM}_{2.5}$	24 horas	38 – 55	56 – 150	≥ 151

10. Conclusiones

El 100% de las muestras de material particulado respirable tomadas en los operarios de barrido de la comuna 16 - Belén, presentaron valores superiores a los niveles máximos permisibles establecidos por la norma nacional de calidad del aire ($37\mu\text{g}/\text{m}^3$) y la recomendación de la Organización Mundial de la Salud ($15\mu\text{g}/\text{m}^3$) para 24 horas de exposición. Los resultados reportaron un valor medio de la concentración de material particulado respirable de $341\mu\text{g}/\text{m}^3$ durante el periodo de monitoreo de aproximadamente seis horas; al calcular las concentraciones halladas para un tiempo de exposición a 24 horas ($\text{TWA}_{24\text{h}}$), se obtiene un promedio de $99,90\mu\text{g}/\text{m}^3$ con un valor mínimo de reportado de $47,20\mu\text{g}/\text{m}^3$ y máximo de $362,20\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Del total de las mediciones realizadas de exposición personal a material particulado respirable, las cuales abarcaron 13 barrios de la comuna 16 – Belén, las mayores concentraciones de este contaminante se presentaron en el barrio San Bernardo, con un promedio de $498\mu\text{g}/\text{m}^3$ para un tiempo de exposición de aproximadamente 6 horas, siendo este barrio el que reportó el mayor número de casos de morbimortalidad por $\text{PM}_{2.5}$ entre los años 2010 y 2016 según Piñeros y colaboradores en el estudio sobre “*Carga de la enfermedad, costos derivados y geolocalización de la morbimortalidad, atribuibles a la contaminación por $\text{PM}_{2.5}$ en Medellín 2010-2016*”(77).

De acuerdo con los resultados de la encuesta de percepción de la calidad del aire, el 66,7% de los operarios de barrido de la comuna de Belén, consideró que la calidad del aire a la que están expuestos es regular o mala, de éstos el 31,1% presentaron niveles de exposición superiores a la media de concentración del material particulado respirable ($341\mu\text{g}/\text{m}^3$). Lo anterior, se reafirma con el hecho de que el 60% de los encuestados manifestó haber presentado por lo menos un síntoma (ardor en los ojos, gripa frecuente y congestión nasal), de los cuales 10 estuvieron expuestos a concentraciones por encima de la media y 17 por debajo.

Bibliografía

1. Real Academia Española. Diccionario de la lengua española [Internet]. [citado el 5 de enero de 2024]. Disponible en: <https://dle.rae.es/operario%20de%20barrido?m=form>
2. Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental. Modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos. Cúcuta - Región. [Internet]. Cúcuta; 2022 mar [citado el 5 de enero de 2024]. Disponible en: <https://corponor.gov.co/web/wp-content/uploads/2022/05/Modelo-de-dispersion.pdf>
3. Agencia de Protección Ambiental. Aire [Internet]. [citado el 14 de enero de 2024]. Disponible en: <https://espanol.epa.gov/espanol/aire>
4. EPA. Glosario ambiental bilingüe [Internet]. [citado el 14 de enero de 2024]. Disponible en: <https://espanol.epa.gov/espanol/glosario-ambiental-bilingue>
5. SISAIRE. Gobernanza del aire, Glosario. [Internet]. [citado el 5 de enero de 2024]. Disponible en: <http://sisaire.ideam.gov.co/ideam-sisaire-web/aprendizaje.xhtml?de=GLOSARIO>
6. Instituto Nacional del Cáncer. Diccionario de cáncer del NCI [Internet]. [citado el 5 de enero de 2024]. Disponible en: <https://www.cancer.gov/espanol/publicaciones/diccionarios/diccionario-cancer>
7. Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire. Glosario de términos calidad del aire [Internet]. [citado el 9 de enero de 2024]. Disponible en: <https://sinca.mma.gob.cl/uploads/documentos/0421bb0ff871345a30af6df2a3b9a476.pdf>
8. Sexton K, Barry Ryan P. Assessment of Human Exposure to Air Pollution: Methods, Measurements, and Models. En: Air Pollution, the Automobile, and Public Health [Internet]. Washington D.C.; 1988 [citado el 19 de septiembre de 2023]. p. 207–32. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK218147/>
9. ONU MUJERES. ¿Cuál es el monitoreo y la evaluación? [Internet]. 2010 [citado el 9 de enero de 2024]. Disponible en: <https://www.endvawnow.org/es/articles/330-cul-es-el-monitoreo-y-la-evaluacin.html>
10. Vargas I. La UAESP en los zapatos de un operario de barrido [Internet]. 2020 [citado el 5 de enero de 2024]. Disponible en: <https://www.uaesp.gov.co/noticias/la-uaesp-los-zapatos-operario-barrido#:~:text=%E2%80%9CUsualmente%20a%20la%20persona%20que,de%20Operaciones%20de%20Promoambiental%20Distrito.>

11. Health Effects Institute. State of global air [Internet]. Boston, MA; 2019 [citado el 20 de septiembre de 2023]. Disponible en: https://www.stateofglobalair.org/sites/default/files/soga_2019_report.pdf
12. Grisales Romero H, Piñeros Jiménez JG. Local attributable burden disease to PM2.5 ambient air pollution in Medellín, Colombia, 2010–2016. F1000Res [Internet]. el 6 de diciembre de 2021 [citado el 19 de septiembre de 2023];10(428):1–28. Disponible en: <https://f1000research.com/articles/10-428>
13. Agencia de protección Ambiental de Estados Unidos [Internet]. 2023 [citado el 19 de septiembre de 2023]. Disponible en: <https://espanol.epa.gov/espanol/aire#contaminacion>
14. La contaminación del aire y los problemas respiratorios. Revista de la Facultad de Medicina (México) [Internet]. octubre de 2015 [citado el 19 de septiembre de 2023];58(5):44–7. Disponible en: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0026-17422015000500044&lng=es
15. Consejo Nacional de Política Económica y Social. Documento Conpes 3943: Política para el mejoramiento de la calidad del aire [Internet]. Bogotá, D.C.; 2018 jul [citado el 19 de septiembre de 2023]. Disponible en: <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3943.pdf>
16. Registro Único Nacional de Tránsito. Balance del primer semestre de 2022 Sector tránsito y transporte en Colombia [Internet]. 2022 [citado el 19 de septiembre de 2023]. Disponible en: <https://www.runt.com.co/sites/default/files/Cifras-%20Balance%20Semestre%202022.pdf>
17. Instituto Nacional de Salud. Carga de Enfermedad Ambiental en Colombia [Internet]. 2018 [citado el 19 de septiembre de 2023]. Disponible en: <https://www.ins.gov.co/Direcciones/ONS/Informes/10%20Carga%20de%20enfermedad%20ambiental%20en%20Colombia.pdf>
18. Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Contaminación atmosférica y sus efectos sobre la salud de los habitantes del Valle de Aburrá. [Internet]. 2019 dic [citado el 19 de septiembre de 2023]. Disponible en: https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/Biblioteca-aire/Estudios-calidad-del-aire/contaminacion_atmosferica_efectos_salud.pdf
19. Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Clean Air Institute, Universidad Pontificia Bolivariana. Plan Integral de Gestión de la Calidad del Aire [Internet]. Washington D.C.; 2017 ago [citado el 19 de septiembre de 2023]. Disponible en: <https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/Documents/PIGECA/PIGECA-Aprobado-Dic-2017.pdf>

20. Piñeros Jiménez JG, Franco Piedrahita MC, Montealegre Hernández NA, Grisales Vargas SC, Gutiérrez Cano YA, Grisales Romero H. Distribución espacial de la morbimortalidad atribuible a la contaminación del aire por pm2.5 en Medellín (Colombia), 2010-2016. Revista Facultad Nacional de Salud Pública [Internet]. el 2 de marzo de 2022 [citado el 19 de septiembre de 2023];40(2). Disponible en: <https://revistas.udea.edu.co/index.php/fnsp/article/view/346589>
21. International Society for Environmental Epidemiology [Internet]. 2023 [citado el 19 de septiembre de 2023]. Disponible en: <https://iseepi.org/>
22. Área Metropolitana del Valle de Aburrá [Internet]. 2023 [citado el 19 de septiembre de 2023]. Disponible en: <https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/>
23. Ramírez Vélez AM. Prueba piloto para determinar la posible exposición a material particulado respirable en motociclistas de la zona centro de Medellín, 2013 [Internet]. [Medellín]: Universidad de Antioquia; 2013 [citado el 19 de septiembre de 2023]. Disponible en: https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/30658/1/Ram%C3%ADrezAna_2013_PruebaMaterialParticulado.pdf
24. Segura Tirado CE. Exposición a material particulado respirable y morbilidad respiratoria sentida en una muestra de venteros informales del sector centro de la ciudad de Medellín: septiembre-noviembre 2017. [Medellín]: Universidad de Antioquia; 2019.
25. Emvarias Grupo EPM [Internet]. 2023 [citado el 19 de septiembre de 2023]. Disponible en: <https://www.emvarias.com.co/emvarias/De-inter%C3%A9s/Mapa-Servicio-P%C3%BAblico-de-Aseo>
26. Secretaría de gestión y control territorial de Medellín, Alcaldía de Medellín, Universidad de Antioquia. Contrato interadministrativo 4600085937 de 2020 para la revisión y actualización del Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos PGIRS de Medellín [Internet]. Medellín; [citado el 19 de septiembre de 2023]. Disponible en: <https://www.medellin.gov.co/irj/go/km/docs/pccdesign/medellin/Temas/Catastro/Publicaciones/Shared%20Content/Documentos/2022/4%20Barrido%20y%20limpieza%20de%20v%C3%ADas%20p%C3%BAblicas.pdf>
27. Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Caracterización del Material Particulado PM2.5 en el Valle de Aburrá Fase IV [Internet]. 2021 [citado el 19 de septiembre de 2023]. Disponible en: <https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/Biblioteca-aire/Estudios-calidad-del-aire/Informe-Final-Characterizacion-Fase-IV.pdf>

28. Peralta O, Marcovich G. Percepción de la contaminación atmosférica en la Ciudad de México. [Internet]. 1999 [citado el 19 de septiembre de 2023]. Disponible en: https://www.puec.unam.mx/pdf/libros_digitales/Publicaciones/percepcion_contaminacion.pdf
29. Aránguez E, Ordóñez JM, Serrano J, Aragonés N, Fernández Patier R, Gandarillas A, et al. Contaminantes atmosféricos y su vigilancia. Rev Esp Salud Publica [Internet]. marzo de 1999 [citado el 19 de septiembre de 2023];73(2):123–32. Disponible en: https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1135-57271999000200003
30. Organización Mundial de la Salud. Contaminación del aire ambiente (exterior) [Internet]. 2022 [citado el 19 de septiembre de 2023]. Disponible en: [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
31. Echeverri Londoño CA, Maya Vasco GJ. Relación entre las partículas finas (PM2.5) y respirables (PM10) en la ciudad de Medellín. Revista Ingenierías Universidad de Medellín [Internet]. 2008 [citado el 19 de septiembre de 2023];7(12):23–42. Disponible en: <https://revistas.udem.edu.co/index.php/ingenierias/article/view/198/185>
32. Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Principales contaminantes del aire [Internet]. [citado el 19 de septiembre de 2023]. Disponible en: <https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/Paginas/Generalidades/Principales-contaminantes.aspx>
33. Organización Mundial de la Salud. Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire [Internet]. Ginebra; 2021 [citado el 19 de septiembre de 2023]. Disponible en: <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/346062/9789240035461-spa.pdf?isAllowed=y&sequence=1>
34. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Resolución 2254 de 2017, noviembre 1, por la cual se adopta la norma de calidad del aire ambiente y se dictan otras disposiciones. Colombia ; 2017.
35. Ministerio del Medio Ambiente. Decreto 948 de 1995, junio 5, por el cual se reglamentan, parcialmente, la Ley 23 de 1973, los artículos 33, 73, 74, 75 y 76 del Decreto - Ley 2811 de 1974; los artículos 41, 42, 43, 44, 45, 48 y 49 de la Ley 9 de 1979; y la Ley 99 de 1993, en relación con la prevención y control de la contaminación atmosférica y la protección de la calidad del aire. Colombia; 1995.
36. Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Actualización inventario de emisiones atmosféricas del Valle de Aburrá – año 2018. [Internet]. 2020 may [citado el 19 de septiembre de 2023]. Disponible en:

- <https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/Documents/Inventario-de-emisiones/Inventario-de-Emisiones-2018.pdf>
37. UNICEF, Daly A, Cognuck González S. Calidad del aire: ¡Es el momento de actuar! [Internet]. Panamá; 2021 [citado el 19 de septiembre de 2023]. Disponible en: <https://www.unicef.org/lac/media/27856/file/Calidad-del-aire-es-el-momento-de-actuar.pdf>
 38. Fasecolda. Sistema General de Riesgos Laborales [Internet]. [citado el 19 de septiembre de 2023]. Disponible en: <https://sistemas.fasecolda.com/rldatos/Home.aspx>
 39. Linares Gil C. Las PM 2.5 y su impacto sobre la salud. El caso de la ciudad de Madrid. Ecosostenible [Internet]. 2007 [citado el 19 de septiembre de 2023];35:32–7. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/revista?codigo=6052>
 40. IDEAM. Monitoreo del aire [Internet]. [citado el 19 de septiembre de 2023]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/web/siac/monitoreoaire>
 41. Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá [Internet]. 2010 [citado el 19 de septiembre de 2023]. Disponible en: https://siata.gov.co/sitio_web/index.php/
 42. Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Red Aire [Internet]. [citado el 19 de septiembre de 2023]. Disponible en: <https://www.metropol.gov.co/ambientales/aire/red-aire>
 43. SIAFA. Bomba de muestreo de aire de caudal constante marca Sensidyne-Gilian, modelo GilAir3 [Internet]. [citado el 19 de septiembre de 2023]. Disponible en: <https://siafa.com.ar/producto-detalle/gilian-gilair-3>
 44. Galán Vega JS. Evaluación de la exposición personal y de área a material particulado PM2.5 y PM10 en el Valle de Sogamoso [Internet]. [citado el 19 de septiembre de 2023]. Disponible en: <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/17440/u713608.pdf?sequence=1>
 45. Rodríguez Reales RR, Núñez Blanco YP. Nivel de exposición personal a material particulado inhalable PM2.5 proveniente de vías de alto tráfico vehicular de la ciudad de Barranquilla [Internet]. [Barranquilla]: Corporación Universidad de la Costa; 2016 [citado el 19 de septiembre de 2023]. Disponible en: <https://repositorio.cuc.edu.co/bitstream/handle/11323/290/1045717701%20-%20201140868213.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
 46. Rodríguez Sotomonte JS, Sánchez Orjuela AV. Estimaciones de exposición personal a material particulado, níquel y cobalto en actividades de ciclorruta día

- domingo desde la calle 170 con 9 hasta la calle 116 con 15 en el tramo norte de la ciudad de Bogotá, Colombia [Internet]. [Bogotá, D.C.]: Universidad Santo Tomas; 2014 [citado el 19 de septiembre de 2023]. Disponible en: <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/51331>
47. Jaramillo Meneses LM. Estudio de la exposición a material particulado 2.5 a lo largo de corredores viales principales en la ciudad de Bogotá. Bogotá, D.C.; 2014.
 48. Beelen R, Hoek G, Vienneau D, Eeftens M, Dimakopoulou K, Pedeli X, et al. Development of NO₂ and NO_x land use regression models for estimating air pollution exposure in 36 study areas in Europe – The ESCAPE project. Atmospheric Environment [Internet]. junio de 2013 [citado el 19 de septiembre de 2023];72:10–23. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1352231013001386>
 49. Londoño Ciro LA, Cañón Barriga JE. Metodología para la aplicación de modelos de regresión de usos del suelo en la estimación local de la concentración mensual de PM₁₀ en Medellín-Colombia. Revista Politécnica [Internet]. 2015 [citado el 19 de septiembre de 2023];11(21):29–40. Disponible en: https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/27954/1/Londo%C3%B1oLibardo_2015_MetodologiaUsosSuelo.pdf
 50. Grisales Vargas SC. Modelos de regresión de usos del suelo para la caracterización espacial de la contaminación del aire por PM_{2.5} en la ciudad de Medellín-Colombia, 2018 [Internet]. [Medellín]: Universidad de Antioquia; 2020 [citado el 19 de septiembre de 2023]. Disponible en: https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/16376/1/GrisalesSara_2020_ContaminacionAireEspacial.pdf
 51. Asamblea Nacional Constituyente. Constitución Política 1 de 1991. Colombia; 1991.
 52. Congreso de la República de Colombia. Ley 9 de 1979 por la cual se dictan Medidas Sanitarias. 35308 Colombia; jul 16, 1979.
 53. Ley 99 de 1993 [Internet]. Santafé de Bogotá; dic 22, 1993. Disponible en: https://www.mininterior.gov.co/sites/default/files/dacn_ley_99_de_1993_0.pdf
 54. Ministerio del Trabajo. Decreto 1072 de 2015, mayo 26, Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Trabajo. Colombia; 2015.
 55. Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. Resolución 909 de 2008, junio 5, 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. Colombia; 2008.
56. Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. Resolución 910 de 2008, junio 24, por la cual se reglamentan los niveles permisibles de emisión de contaminantes que deberán cumplir las fuentes móviles terrestres, se reglamenta el artículo 91 del Decreto 948 de 1995 y se adoptan otras disposiciones. Colombia; 2008.
 57. Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. Resolución 650 de 2010, marzo 29, por la cual se adopta el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire. Bogotá. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Colombia; 2010.
 58. Organización Mundial de la Salud, Organización Panamericana de la Salud. Hoja de ruta del programa de calidad del aire de la OPS/OMS [Internet]. 2018 [citado el 19 de septiembre de 2023]. Disponible en: <https://www.paho.org/es/documentos/hoja-ruta-calidad-aire-opsoms-agenda-estrategica-para-inclusion-salud-gestion-calidad-0>
 59. ACGIH. TLV/BEI Guidelines [Internet]. 2020 [citado el 19 de septiembre de 2023]. Disponible en: <https://www.acgih.org/science/tlv-bei-guidelines/>
 60. ACGIH. Particulates not otherwise regulated, respirable 0600 [Internet]. [citado el 19 de septiembre de 2023]. Disponible en: <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2003-154/pdfs/0600.pdf>
 61. Emvarias. Reglamento interno de trabajo [Internet]. Medellín; 2019 feb [citado el 19 de septiembre de 2023]. Disponible en: https://www.emvarias.com.co/emvarias/Portals/0/ThemePluginPro/uploads/2021/12/13/REGLAMENTO_INTERNO_EMVARIAS_2019.pdf
 62. Territorial Medellín cómo vamos [Internet]. [citado el 19 de septiembre de 2023]. Disponible en: <https://www.medellincomovamos.org/medellin>
 63. Comunas de Medellín [Internet]. [citado el 19 de septiembre de 2023]. Disponible en: <https://comunasdemedellin.com/comuna-16-de-medellin-belen/>
 64. Alcaldía de Medellín. Plan de Desarrollo Local Comuna 16, Belén [Internet]. Medellín; 2015 sep [citado el 19 de septiembre de 2023]. Disponible en: https://www.medellin.gov.co/ndesarrollo/wp-content/uploads/Archivos_ND/CD_PDLS/COMUNA_16/PDL/COMUNA%2016%20BELEN.pdf
 65. Alcaldía de Medellín. Ficha de Caracterización Comuna 16: Belén [Internet]. Medellín; [citado el 19 de septiembre de 2023]. Disponible en:

<https://www.medellin.gov.co/irj/go/km/docs/pccdesign/medellin/Temas/PlaneacionMunicipal/Publicaciones/Shared%20Content/Documentos/2021/Comuna%2016%20Belen%20-Ficha%20Informativa.pdf>

66. Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Anexo1. Tablas de Resumen de estadísticos a lo largo del año 2021 [Internet]. 2022 [citado el 19 de septiembre de 2023]. Disponible en: https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/Documents/Resumenes-calidad-del-aire/Resumen-Calidad-del-Aire-Diciembre2021_Anexos.pdf
67. Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Anexo1. Tablas de Resumen de estadísticos a lo largo del año 2022 [Internet]. 2023 [citado el 19 de septiembre de 2023]. Disponible en: <https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/Documents/Resumenes-calidad-del-aire/Resumen-Calidad-del-Aire-Diciembre2022-Anexos.pdf>
68. Rodríguez M, Mendivelso F. Diseño de investigación de corte transversal. Revista Médica Sanitas [Internet]. 2018 [citado el 19 de septiembre de 2023];21(3):141–7. Disponible en: <https://revistas.unisanitas.edu.co/index.php/RMS/article/view/368>
69. Aguilar Barojas S. Fórmulas para el cálculo de la muestra en investigaciones de salud. Salud en Tabasco [Internet]. 2005 [citado el 19 de septiembre de 2023];11(2):333–8. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/487/48711206.pdf>
70. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. Evaluación de la exposición laboral a aerosoles (III): muestreadores de la fracción torácica, respirable y multifracción [Internet]. 2007 [citado el 19 de septiembre de 2023]. Disponible en: <https://www.insst.es/documents/94886/327740/ntp-765.pdf/b9f1ba1a-6163-46ed-9059-4ecf4026a9a3>
71. Fieramosca F, Lezama E, Manrique R, Quirós O, Farias M, Rondón S, et al. La función respiratoria y su repercusión a nivel del Sistema Estomatognático. Revista Latinoamericana de Ortodoncia y Odontopediatría [Internet]. el 27 de abril de 2007 [citado el 3 de diciembre de 2023]; Disponible en: <https://www.ortodoncia.ws/publicaciones/2007/art-5/>
72. Congreso de la República. Ley 1266 de 2008 [Internet]. Bogotá, D.C.; 2008 dic [citado el 9 de enero de 2024]. Disponible en: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=34488>
73. Ariza LV, Sánchez MA, Franco JF. Percepción ciudadana sobre el impacto de la contaminación Percepción ciudadana sobre el impacto de la contaminación atmosférica en salud y calidad de vida: estudio piloto. Épsilon. 2013;21(10).

74. Vahos Monsalve DL. PERCEPCIONES DE LOS HABITANTES DEL MUNICIPIO DE SABANETA FRENTE A LOS CAMBIOS EN LA CALIDAD DEL AIRE Y SU INFLUENCIA EN LA SALUD PÚBLICA ENTRE LOS AÑOS 2015-2020. Universidad de Manizales; 2020.
75. Secretaria Seccional de Salud y Protección Social de Antioquia. Análisis de situación de salud 2021, subregión Valle de Aburrá. 2022.
76. Medellín cómo vamos. Informe de calidad de vida de Medellín 2018. 2018.
77. Grisales Romero H. Carga de la enfermedad, costos derivados y geolocalización de la morbimortalidad, atribuibles a la contaminación por PM2.5 en Medellín, 2010-2016 [Internet]. Medellín; 2021 may [citado el 9 de diciembre de 2023]. Disponible en: <https://www.corantioquia.gov.co/wp-content/uploads/2022/01/3-Cartilla-investigacion-a-contaminacion-por-PM-2.5.pdf>

Anexos

Anexo 1. Formato de calibración de monitores personales.

	Muestras descartadas por inconvenientes técnicos en el trabajo de campo.
	Muestras descartadas por incumplimiento de porcentaje de diferencia entre calibración y post-calibración

Ajuste y verificación de caudal de bombas de monitoreo personal													
Facultad Nacional de Salud Pública Laboratorio de Salud Pública Área de higiene ambiental													
Ciudad: Medellín													
Marca de la bomba: Gillan													
Sustancia a mostrar: Material Particulado													
Fecha	Identificación de la muestra	Ajuste de caudal (l/min)			Rango de caudal a ajustar (l/min)	Serie de la bomba	Verificación de caudal (l/min)			Promedio entre ajuste y verificación (l/min)	Diferencia entre ajuste y verificación (%)		
		Caudal 1	Caudal 2	Caudal 3			Caudal 1	Caudal 2	Caudal 3				
28/08/2023	MPP-2023-001	1.748	1.725	1.723	1.732	1.732	1.721	1.723	1.765	1.753	1.746	3.40	
28/08/2023	MPP-2023-002	1.734	1.726	1.721	1.727	1.727	1.704	1.726	1.704	1.721	1.724	1.20	
29/09/2023	MPP-2023-003	2.535	2.525	2.516	2.525	122154	No se realiza verificación por prueba en mal estado						
28/08/2023	MPP-2023-004	2.510	2.548	2.538	2.532	122156	2.489	2.486	2.473	2.483	2.507	-0.69	
29/08/2023	MPP-2023-005	1.752	1.748	1.748	1.753	122159	1.789	1.786	1.770	1.786	1.770	4.88	
29/08/2023	MPP-2023-006	1.745	1.760	1.755	1.753	122160	1.793	1.787	1.784	1.788	1.771	4.97	
29/08/2023	MPP-2023-007	2.541	2.539	2.534	2.538	122154	2.480	2.487	2.486	2.487	2.513	-0.50	
29/08/2023	MPP-2023-008	2.548	2.552	2.553	2.551	122156	2.564	2.567	2.561	2.564	2.558	2.50	
30/08/2023	MPP-2023-009	2.545	2.544	2.544	2.544	122154	2.569	2.57	2.57	2.570	2.557	2.72	
30/08/2023	MPP-2023-010	2.547	2.540	2.535	2.541	122156	2.58	2.578	2.58	2.579	2.580	3.10	
30/08/2023	MPP-2023-011	1.766	1.763	1.767	1.765	122159	1.711	1.712	1.712	1.712	1.739	0.67	
30/08/2023	MPP-2023-012	1.749	1.744	1.745	1.746	122160	1.780	1.781	1.780	1.780	1.763	4.56	
31/08/2023	MPP-2023-013	2.532	2.533	2.532	2.532	122154	2.609	2.594	2.584	2.586	2.584	3.73	
31/08/2023	MPP-2023-014	1.766	1.768	1.762	1.768	122159	1.748	1.745	1.745	1.745	1.762	2.58	
31/08/2023	MPP-2023-015	1.767	1.769	1.767	1.768	122160	1.719	1.717	1.718	1.717	1.731	4.38	
1/09/2023	MPP-2023-016	2.58	2.575	2.578	2.578	122154	2.665	2.661	2.658	2.620	2.620	6.18	
1/09/2023	MPP-2023-017	2.53	2.524	2.521	2.525	122156	2.555	2.546	2.548	2.550	2.538	1.97	
1/09/2023	MPP-2023-018	1.726	1.737	1.729	1.731	122159	1.743	1.757	1.765	1.755	1.743	3.16	
1/09/2023	MPP-2023-019	1.726	1.767	1.773	1.771	122160	1.75	1.743	1.738	1.743	1.745	2.45	
4/09/2023	MPP-2023-020	2.539	2.543	2.542	2.541	122154	2.558	2.563	2.560	2.561	2.551	2.38	
4/09/2023	MPP-2023-021	2.539	2.535	2.534	2.543	122156							
4/09/2023	MPP-2023-022	1.759	1.752	1.763	1.758	122159	1.726	1.731	1.727	1.727	1.742	1.53	
4/09/2023	MPP-2023-023	1.75	1.768	1.765	1.761	122160	1.762	1.764	1.755	1.760	1.761	3.43	
5/09/2023	MPP-2023-024	2.533	2.543	2.545	2.540	122154	2.636	2.630	2.643	2.636	2.588	5.27	
5/09/2023	MPP-2023-025	2.534	2.534	2.532	2.533	122156	2.697	2.601	2.686	2.695	2.564	3.72	
5/09/2023	MPP-2023-026	1.757	1.759	1.748	1.759	122159	1.734	1.724	1.732	1.730	1.742	1.72	
5/09/2023	MPP-2023-027	1.746	1.727	1.733	1.735	122160	1.719	1.711	1.767	1.712	1.754	4.12	
5/09/2023	MPP-2023-028	2.553	2.535	2.543	2.540	122154	2.530	2.542	2.548	2.540	2.542	1.57	
5/09/2023	MPP-2023-029	2.55	2.5	2.5	2.500	122156	2.769	2.772	2.769	2.770	2.635	10.25	
5/09/2023	MPP-2023-030	1.649	1.651	1.647	1.649	122159	1.604	1.598	1.604	1.598	1.624	-6.26	
6/09/2023	MPP-2023-031	1.743	1.738	1.742	1.741	122160	1.769	1.769	1.764	1.767	1.754	3.84	
7/09/2023	MPP-2023-032	2.525	2.528	2.526	2.526	122154	2.533	2.560	2.572	2.555	2.541	2.16	
7/09/2023	MPP-2023-033												
7/09/2023	MPP-2023-034												
7/09/2023	MPP-2023-035	2.561	2.554	2.550	2.555	122156	2.612	2.607	2.598	2.606	2.580	4.10	
7/09/2023	MPP-2023-036	1.744	1.742	1.741	1.742	122159	1.773	1.767	1.769	1.770	1.756	3.97	
7/09/2023	MPP-2023-037	1.763	1.761	1.764	1.763	122160							
8/09/2023	MPP-2023-038	2.567	2.579	2.568	2.568	122154	2.489	2.564	2.490	2.508	2.538	0.30	
8/09/2023	MPP-2023-039	2.562	2.558	2.558	2.559	122156	2.23	2.22	2.15	2.200	2.379	-12.61	
8/09/2023	MPP-2023-040	1.76	1.759	1.748	1.756	122159	1.671	1.709	1.729	1.703	1.739	0.17	
8/09/2023	MPP-2023-041	1.737	1.732	1.727	1.732	122160	1.760	1.719	1.759	1.746	1.739	2.65	
12/09/2023	MPP-2023-042	2.58	2.56	2.561	2.564	122154	2.675	2.653	2.675	2.668	2.666	4.64	
12/09/2023	MPP-2023-043	1.76	1.764	1.764	1.764	122159	1.714	1.714	1.714	1.714	1.714	0.36	
12/09/2023	MPP-2023-044	1.769	1.769	1.769	1.769	122160	1.724	1.724	1.724	1.724	1.724	1.38	
13/09/2023	MPP-2023-045	2.521	2.553	2.5	2.625	122154	2.664	2.664	2.675	2.546	2.538	1.83	
13/09/2023	MPP-2023-046	2.521	2.564	2.564	2.564	122156	2.668	2.576	2.570	2.576	2.561	1.89	
13/09/2023	MPP-2023-047	1.796	1.714	1.714	1.741	122159	1.739	1.775	1.769	1.761	1.761	3.48	
13/09/2023	MPP-2023-048	1.759	1.739	1.749	1.759	122160	1.704	1.724	1.685	1.704	1.727	0.25	
14/09/2023	MPP-2023-049	2.553	2.597	2.564	2.571	122154	2.566	2.566	2.566	2.566	2.566	2.35	
14/09/2023	MPP-2023-050	2.597	2.564	2.564	2.575	122156	2.686	2.686	2.686	2.686	2.581	3.33	
14/09/2023	MPP-2023-051	2.597	2.564	2.564	2.575	122159	1.719	1.724	1.709	1.717	1.717	0.99	
14/09/2023	MPP-2023-052	1.775	1.754	1.775	1.768	122160	1.734	1.714	1.744	1.731	1.742	1.76	
14/09/2023	MPP-2023-053	1.759	1.749	1.749	1.752	122160	1.749	1.749	1.749	1.749	1.749	1.76	

Anexo 2. Formato de condiciones de trabajo de campo.

	Muestras descartadas por inconvenientes técnicos en el trabajo de campo.
	Muestras descartadas por incumplimiento de porcentaje de diferencia entre calibración y post-calibración

 UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA Facultad Nacional de Salud Pública		Ajuste y verificación de caudal de bombas de monitoreo personal				
		Facultad Nacional de Salud Pública				
		Laboratorio de Salud Pública				
		Área de higiene ambiental				
Fecha	Identificación de la muestra	Hora inicio	Hora fin	Tiempo muestreado (Horas)	Temperatura (°C)	Presión atmosférica (mmHg)
29/08/2023	MPP-2023-001	7:00	13:10	6:10	23,23	846,10
29/08/2023	MPP-2023-002	6:50	12:50	6:00	23,23	846,10
29/08/2023	MPP-2023-003	6:18	12:18	6:00	23,23	846,10
29/08/2023	MPP-2023-004	6:30	12:33	6:03	23,23	846,10
30/08/2023	MPP-2023-005	6:16	12:18	6:02	26,03	839,79
30/08/2023	MPP-2023-006	6:32	12:32	6:00	26,03	839,79
30/08/2023	MPP-2023-007	6:34	12:40	6:06	26,03	839,79
30/08/2023	MPP-2023-008	6:46	12:50	6:04	26,03	839,79
31/08/2023	MPP-2023-009	6:25	12:25	6:00	24,67	838,80
31/08/2023	MPP-2023-010	6:35	12:35	6:00	24,67	838,80
31/08/2023	MPP-2023-011	7:15	13:15	6:00	24,67	838,80
31/08/2023	MPP-2023-012	7:29	13:19	5:50	24,67	838,80
1/09/2023	MPP-2023-013	7:00	13:10	6:10	24,87	843,23
1/09/2023	MPP-2023-014	7:10	13:15	6:05	24,87	843,23
1/09/2023	MPP-2023-015	7:19	13:25	6:06	24,87	843,23
1/09/2023	MPP-2023-016	7:33	13:30	5:57	24,87	843,23
4/09/2023	MPP-2023-017	6:35	12:35	6:00	22,49	845,21
4/09/2023	MPP-2023-018	6:44	12:45	6:01	22,49	845,21
4/09/2023	MPP-2023-019	6:55	12:55	6:00	22,49	845,21
4/09/2023	MPP-2023-020	7:10	13:10	6:00	22,49	845,21
5/09/2023	MPP-2023-021	6:25	12:35	6:10	24,89	844,50
5/09/2023	MPP-2023-022	6:35	se descargó la bomba		24,89	844,50
5/09/2023	MPP-2023-023	6:35	12:45	6:10	24,89	844,50
5/09/2023	MPP-2023-024	6:40	12:40	6:00	24,89	844,50
6/09/2023	MPP-2023-025	6:40	12:40	6:00	25,26	843,81
6/09/2023	MPP-2023-026	7:00	13:00	6:00	25,26	843,81
6/09/2023	MPP-2023-027	7:10	13:10	6:00	25,26	843,81
6/09/2023	MPP-2023-028	7:20	13:20	6:00	25,26	843,81
7/09/2023	MPP-2023-029	7:40	13:40	6:00	24,87	842,02
7/09/2023	MPP-2023-030	7:50	13:50	6:00	24,87	842,02
7/09/2023	MPP-2023-031	8:00	13:55	5:55	24,87	842,02
7/09/2023	MPP-2023-032	8:10	14:00	5:50	24,87	842,02
8/09/2023	MPP-2023-033	7:45	13:30	5:45	25,05	842,90
8/09/2023	MPP-2023-034			0:00	25,05	842,90
8/09/2023	MPP-2023-035	7:50	13:35	5:45	25,05	842,90
8/09/2023	MPP-2023-036	8:00	13:45	5:45	25,05	842,90
8/09/2023	MPP-2023-037	8:10	13:50	5:40	25,05	842,90
12/09/2023	MPP-2023-038	6:50	13:20	6:30	24,98	844,14
12/09/2023	MPP-2023-039	7:10	13:10	6:00	24,98	844,14
12/09/2023	MPP-2023-040	7:25	13:35	6:10	24,98	844,14
12/09/2023	MPP-2023-041	7:45	13:45	6:00	24,98	844,14
13/09/2023	MPP-2023-042	7:00	13:03	6:03	23,24	844,36
13/09/2023	MPP-2023-043	7:20	13:33	6:13	23,24	844,36
13/09/2023	MPP-2023-044	7:35	13:35	6:00	23,24	844,36
13/09/2023	MPP-2023-045	7:50	13:45	5:55	23,24	844,36
14/09/2023	MPP-2023-046	7:25	13:25	6:00	23,22	844,06
14/09/2023	MPP-2023-047	7:40	13:45	6:05	23,22	844,06
14/09/2023	MPP-2023-048	7:50	13:50	6:00	23,22	844,06
14/09/2023	MPP-2023-049	8:00	13:55	5:55	23,22	844,06
15/09/2023	MPP-2023-050	6:40	13:20	6:40	25,35	843,26
15/09/2023	MPP-2023-051	7:00	13:30	6:30	25,35	843,26
15/09/2023	MPP-2023-052	7:15	13:25	6:10	25,35	843,26
15/09/2023	MPP-2023-053	7:35	13:35	6:00	25,35	843,26

Anexo 3. Formato de concentraciones obtenidas para cada monitoreo.

Identificación muestra	Fecha de medición	Día de semana	Ubicación	Concentración mg/m ³			Concentración ug/m ³
					+/-		
MPP-2023-001	2023-08-29	Martes	Rosales	0,21	+/-	0,2	210
MPP-2023-002	2023-08-29	Martes	San Bernardo	0,26	+/-	0,3	260
MPP-2023-004	2023-08-29	Martes	Rosales	0,19	+/-	0,2	190
MPP-2023-005	2023-08-30	Miércoles	Belén	0,37	+/-	0,3	370
MPP-2023-006	2023-08-30	Miércoles	Belén	0,28	+/-	0,3	280
MPP-2023-007	2023-08-30	Miércoles	Belén	0,17	+/-	0,2	170
MPP-2023-008	2023-08-30	Miércoles	Belén	0,16	+/-	0,2	160
MPP-2023-009	2023-08-31	Jueves	Fátima	0,35	+/-	0,2	350
MPP-2023-010	2023-08-31	Jueves	Fátima	0,54	+/-	0,2	540
MPP-2023-011	2023-08-31	Jueves	Fátima	0,21	+/-	0,3	210
MPP-2023-012	2023-08-31	Jueves	Rosales	0,37	+/-	0,3	370
MPP-2023-013	2023-09-01	Viernes	San Bernardo	0,71	+/-	0,2	710
MPP-2023-015	2023-09-01	Viernes	La Gloria	0,46	+/-	0,2	460
MPP-2023-016	2023-09-01	Viernes	La Mota	0,38	+/-	0,4	380
MPP-2023-017	2023-09-04	Lunes	San Bernardo	0,39	+/-	0,2	390
MPP-2023-018	2023-09-04	Lunes	San Bernardo	0,32	+/-	0,2	320
MPP-2023-019	2023-09-04	Lunes	San Bernardo	1,39	+/-	0,3	1390
MPP-2023-020	2023-09-04	Lunes	Rosales	0,28	+/-	0,2	280
MPP-2023-021	2023-09-05	Martes	Diego Echavarría	0,38	+/-	0,2	380
MPP-2023-023	2023-09-05	Martes	Diego Echavarría	0,24	+/-	0,2	240
MPP-2023-024	2023-09-05	Martes	Diego Echavarría	0,39	+/-	0,3	390
MPP-2023-025	2023-09-06	Miércoles	Las Mercedes	0,24	+/-	0,2	240
MPP-2023-027	2023-09-06	Miércoles	La Palma	0,78	+/-	0,3	780
MPP-2023-028	2023-09-06	Miércoles	Los Alpes	0,15	+/-	0,25	150
MPP-2023-029	2023-09-07	Jueves	San Bernardo	0,18	+/-	0,2	180
MPP-2023-031	2023-09-07	Jueves	San Bernardo	0,49	+/-	0,3	490
MPP-2023-032	2023-09-07	Jueves	San Bernardo	0,25	+/-	0,3	250
MPP-2023-033	2023-09-08	Viernes	La Mota	0,2	+/-	0,2	200
MPP-2023-035	2023-09-08	Viernes	La Mota	0,43	+/-	0,2	430
MPP-2023-036	2023-09-08	Viernes	La Mota	0,24	+/-	0,3	240
MPP-2023-038	2023-09-12	Martes	Rosales	0,36	+/-	0,2	360
MPP-2023-040	2023-09-12	Martes	Rosales	0,22	+/-	0,2	220
MPP-2023-041	2023-09-12	Martes	Rosales	0,43	+/-	0,3	430
MPP-2023-042	2023-09-13	Miércoles	Las Violetas	0,28	+/-	0,2	280
MPP-2023-043	2023-09-13	Miércoles	Las Mercedes	0,35	+/-	0,2	350
MPP-2023-044	2023-09-13	Miércoles	Las Mercedes	0,46	+/-	0,3	460
MPP-2023-045	2023-09-13	Miércoles	Los Alpes	0,34	+/-	0,3	340
MPP-2023-046	2023-09-14	Jueves	El Rincón	0,13	+/-	0,2	130
MPP-2023-047	2023-09-14	Jueves	El Rincón	0,27	+/-	0,2	270
MPP-2023-048	2023-09-14	Jueves	El Rincón	0,26	+/-	0,3	260
MPP-2023-049	2023-09-14	Jueves	El Rincón	0,27	+/-	0,3	270
MPP-2023-050	2023-09-15	Viernes	La Gloria	0,17	+/-	0,2	170
MPP-2023-051	2023-09-15	Viernes	Loma de los Bernal	0,29	+/-	0,2	290
MPP-2023-052	2023-09-15	Viernes	La Gloria	0,15	+/-	0,24	150
MPP-2023-053	2023-09-15	Viernes	La Gloria	0,39	+/-	0,3	390

Anexo 4. Encuesta aplicada a los operarios de barrido

Análisis de la exposición individual a material particulado respirable de los operarios de barrido de la comuna de Belén

La presente investigación está siendo ejecutada por Alejandra Ossa Valencia y Cristian Camilo Londoño Restrepo, estudiantes del pregrado en Administración Ambiental y Sanitaria de la Facultad Nacional de Salud Pública de la Universidad de Antioquia y tiene como objetivo "Analizar la exposición individual a material particulado respirable de los operarios de barrido de la comuna de Belén en el año 2023".

La participación en este estudio es voluntaria y la información que se obtenga será estrictamente confidencial y no será usada para ningún propósito fuera de los fines académicos; en tanto, el diligenciamiento de esta encuesta es aplicable solamente para aquellos operarios de barrido que hayan decidido participar en la investigación.

Si tiene alguna duda sobre este proyecto, puede hacer preguntas en cualquier momento de su participación, igualmente, si algunas de las preguntas le parecen incómodas tiene el derecho de hacérselo saber a los investigadores o no responderlas.

 No compartido



Código de muestreo *

Tu respuesta _____

Variables sociodemográficas

Edad *

- 18 a 28 años
- 29 a 39 años
- 40 a 50 años
- 51 a 60 años
- Más de 60 años

Género *

- Masculino
- Femenino
- Otro

En caso de ser mujer ¿Está en embarazo?

- Sí
- No

Barrio de residencia *

Tu respuesta _____

Nivel de estudios *

- Primaria
- Secundaria
- Estudios superiores
- Sin estudios

Variables ocupacionales

Lugar de trabajo *

- Fátima
- Rosales
- Granada
- San Bernardo
- Las Playas
- Diego Echavarría
- La Mota
- La Hondanada
- El Rincón
- La Loma de los Bernal
- La Gloria
- Altavista
- La Palma
- Los Alpes
- Las Violetas
- Las Mercedes
- Nueva Villa de Aburrá
- Miravalle
- El Nogal-Los Almendros
- Cerro Nutibara
- Belén

Tiempo de antigüedad en la zona *

- Menor a 1 año
- Entre 1 y 5 años
- Entre 5 y 10 años
- Más de 10 años

¿Qué elementos de protección personal usa para ejecutar su trabajo? Puede seleccionar más de una opción. *

- Protección auditiva
- Protección ocular
- Protección respiratoria
- Guantes
- Ropa de protección
- Protección para pies

¿Cómo es el flujo vehicular durante su recorrido laboral? *

- Alto
- Medio
- Bajo

¿Cuál es el tipo de zona en la que realiza sus actividades laborales? *

- Industrial
- Institucional
- Residencial
- Comercial

¿Al realizar su recorrido, se encuentra expuesto al humo de cigarrillo de fumadores en su entorno? *

- Sí
- No

Morbilidad diagnosticada

¿Ha estado hospitalizado(a) en los últimos seis meses? *

- Sí
- No

¿Cuál fue el motivo de hospitalización?

Tu respuesta _____

¿Tiene diagnosticadas enfermedades de estos tipos? *

- Enfermedades respiratorias
- Enfermedades cardiovasculares
- Ninguna
- Otro: _____

Morbilidad sentida asociada a la calidad del aire

¿Usted ha experimentado alguno de los siguientes síntomas en el último año? *

- Dificultad para respirar
- Dolor o sensación de opresión y/o pesadez en el pecho
- Ataques de tos frecuentes
- Congestión nasal
- Gripas frecuentes
- Molestias en la garganta
- Ardor, irritación, enrojecimiento en los ojos
- Ardor, irritación, enrojecimiento en la piel
- Ninguno

Percepción personal sobre contaminación del aire

¿Cómo considera que es la calidad del aire en su entorno laboral? *

- Buena
- Regular
- Mala

¿Qué fuentes de contaminación del aire observa en su recorrido? puede seleccionar más de una opción. *

- Quema de basuras
- Emisiones industriales
- Emisiones vehiculares
- Estaciones de servicio de combustible
- Ninguna
- Otro: _____

¿Considera que durante su jornada laboral, la contaminación del aire afecta su salud? *

- Sí
- No
- No sé

¿Tienen establecidas medidas específicas de protección personal cuando en la ciudad tenemos contingencias de calidad del aire? *

- Sí
- No

Si la anterior respuesta fue afirmativa, ¿cuáles medidas se toman?

Tu respuesta _____

Anexo 5. Registro fotográfico de mediciones realizadas.

