

VALORACIÓN ECONÓMICA AMBIENTAL DE LOS EFECTOS EN LA SALUD HUMANA
POR LAS EMISIONES DE MATERIAL PARTICULADO $PM_{2.5}$ Y PM_{10} EN EL ÁREA
URBANA DE VILLAVICENCIO



BRIAN ANDRÉS OSMA LOZANO
MICHAEL STEVEEN PEÑA ORTIZ



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
VILLAVICENCIO
2024

VALORACIÓN ECONÓMICA AMBIENTAL DE LOS EFECTOS EN LA SALUD HUMANA
POR LAS EMISIONES DE MATERIAL PARTICULADO PM_{2.5} Y PM₁₀ EN EL ÁREA
URBANA DE VILLAVICENCIO

BRIAN ANDRÉS OSMA LOZANO
MICHAEL STEVEEN PEÑA ORTIZ

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Ambiental
Línea de investigación: Gestión Socioambiental

Director
Mg. JORGE ELIÉCER PARDO MAYORGA
Magister en Ordenamiento Ambiental del Territorio

Codirector
Mg. WILLIAM ALEJANDRO ARISTIZÁBAL BOSSA
Magister en Educación

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
VILLAVICENCIO
2024

Autoridades Académicas

P. ÁLVARO JOSÉ ARANGO RESTREPO, O.P.

Rector General

P. MAURICIO ANTONIO CORTÉS GALLEGO, O.P.

Vicerrector Académico General

P. JOSÉ ANTONIO BALAGUERA CEPEDA, O.P.

Rector Sede Villavicencio

P. RODRIGO GARCÍA JARA, O.P.

Vicerrector Académico Sede Villavicencio

Mg. JULIETH ANDREA SIERRA TOBÓN

Secretaria de División Sede Villavicencio

Mag. WILLIAM PEÑARANDA ZÁRATE

Decano de la Facultad de Ingeniería Ambiental

Agradecimientos

Con profunda gratitud, los autores de esta tesis queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a todas las personas que hicieron posible la realización de este trabajo. En primer lugar, a nuestras familias, quienes han sido un pilar fundamental en nuestro proceso de formación académica y personal. Su apoyo incondicional, su paciencia y amor han sido un motor que nos ha impulsado a alcanzar esta meta.

A nuestro director de tesis, Jorge Pardo por su invaluable guía, su dedicación y su confianza depositada en nosotros. Sus valiosos aportes, su experiencia y su visión crítica han sido fundamentales para el desarrollo y el éxito de esta investigación, hoy un gran amigo con el que compartimos un logro de muchos más que vendrán.

De igual manera, agradecemos a nuestro codirector, William Aristizábal, por su acompañamiento constante, sus acertadas sugerencias y su compromiso con nuestro trabajo. Su intachable conocimiento en las ciencias matemáticas nos brindó herramientas claves para este trabajo y su pasión por la investigación han sido una fuente de inspiración para nosotros.

A los profesores que se tomaron el tiempo de escucharnos, guiarnos y apoyarnos a lo largo de este proceso, brindándonos sus conocimientos y su orientación, gracias, por su dedicación y por contribuir a nuestro crecimiento académico y personal.

Extendemos nuestro agradecimiento a los amigos y compañeros de carrera que nos acompañaron en este recorrido, compartiendo experiencias, sus ideas y su apoyo mutuo. Ustedes han sido claves para seguir adelante siempre en momentos de incertidumbre.

Finalmente, queremos agradecer a las diferentes secretarías de la Alcaldía de Villavicencio que nos atendieron y se tomaron el tiempo de compartir sus conocimientos sobre las problemáticas ambientales de la ciudad. Su disposición y apertura a la colaboración académica han sido invaluable para la viabilidad y la aplicabilidad de nuestra propuesta.

A todos ustedes, nuestro más sincero reconocimiento y gratitud. Juntos hemos construido este trabajo que esperamos sea una contribución significativa para abordar los desafíos ambientales de nuestra ciudad.

Contenido

	Pág.
Resumen	10
Abstract.....	11
1. Introducción.....	12
2. Objetivos	15
2.1. Objetivo General	15
2.2. Objetivos Específicos.....	15
3. Antecedentes	16
4. Marco Referencial	18
4.1. Marco Teórico.....	18
4.1.1. Método de efecto sitio-dependiente (SDEM Method).....	18
4.1.2. Efectos en salud y medio ambiente por contaminantes atmosféricos.....	18
4.1.3. Exposición aguda a material particulado	19
4.1.4. Infecciones Respiratorias Agudas (IRA)	20
4.1.5. Valoración económica de impactos ambientales	20
4.1.6. Salud Ambiental.....	22
4.2. Marco Legal	23
5. Metodología.....	25
5.1. Fase 1. Recopilación de información de las variables en el área de estudio	26
5.2. Fase 2. Análisis de información recolectada de contaminantes y enfermedades asociadas	28
5.3. Fase 3. Valoración económica ambiental del impacto a la salud pública.....	29
6. Análisis y discusión de resultados	34
6.1. Fase 1. Recopilación de información de las variables en el área de estudio	34
6.1.1. Zonas de mayor índice de tráfico vehicular	34
6.1.2. Emisiones por contaminante atmosférico	39
6.2. Fase 2. Análisis de la información recolectada de contaminantes y enfermedades asociadas	47
6.3. Fase 3. Valoración económica ambiental del impacto a la salud pública.....	54

6.3.1.	Análisis complementario de la valoración económica.....	55
6.3.2.	Propuesta para la reducción de material particulado en el aire.....	58
7.	Impacto social y humanístico del proyecto	68
	Conclusiones.....	69
	Recomendaciones	71
	Referencias	73
	Anexos	88

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Normatividad legal vigente para Colombia	23
Tabla 2. Normatividad municipal	24
Tabla 3. Porcentaje de datos perdidos de PM_{10}	40
Tabla 4. Porcentaje de datos perdidos de $PM_{2.5}$	44
Tabla 5. Casos de IRA presentados entre junio de 2022 y junio de 2023	47
Tabla 6. Tasas de incidencia. Casos por cada 100.000 habitantes	48
Tabla 7. Riesgos Relativos por un cambio de $10 \mu g/m^3$	49
Tabla 8. Casos atribuibles para hospitalización de IRA por $PM_{2.5}$ y PM_{10}	50
Tabla 9. Tasa de incidencia de hospitalización de IRA por material particulado	51
Tabla 10. Casos atribuibles de mortalidad por IRA asociado con $PM_{2.5}$ y PM_{10}	52
Tabla 11. Tasa de incidencia de mortalidad de IRA por material particulado	53
Tabla 12. Estimación de costos por hospitalización para el año 2022	54
Tabla 13. Costos totales de hospitalización atribuibles	55
Tabla 14. Especies arbóreas seleccionadas para la propuesta	61
Tabla 15. Clasificación de las especies según su capacidad de remoción de PM	62

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Comparación de tamaño de las partículas de material particulado	19
Figura 2. Fases establecidas para el correcto desarrollo del proyecto.	25
Figura 3. Procedimiento para la valoración económica.....	30
Figura 4. Revisión sistemática de literatura para la propuesta	32
Figura 5. Distribución por tipología vehicular.....	34
Figura 6. Medio de transporte más utilizado	35
Figura 7. Distribución de la flota de vehículos de TPC por edad.....	36
Figura 8. Total de viajes diarios por medio de transporte en Villavicencio	37
Figura 9. Principales centros atractores de viajes de la población en Villavicencio	38
Figura 10. Promedio anual PM_{10} en los seis puntos de monitoreo.....	41
Figura 11. Concentraciones de PM_{10} entre junio de 2022 y 2023.....	42
Figura 12. Promedio anual $PM_{2.5}$ en los cuatro puntos de monitoreo.	45
Figura 13. Concentraciones de $PM_{2.5}$ entre junio de 2022 y 2023	46
Figura 14. Aumento de casos atribuibles de IRA entre el 2024 al 2042	56
Figura 15. Costos estimados de hospitalización por IRA entre 2024 y 2042	57
Figura 16. Resultados obtenidos de la revisión sistemática.....	59
Figura 17. Diseño de coberturas vegetales para la reducción de material particulado	64
Figura 18. Casos atribuibles de IRA entre el 2024 al 2042 con la propuesta.....	66
Figura 19. Costos estimados de hospitalización por IRA con la propuesta.....	67

Lista de Anexos

	Pág.
Anexo 1. Principales centros atractores de la población en la ciudad de Villavicencio.....	88
Anexo 2. Valores específicos por semana y día, a partir del modelo SDEM.....	89
Anexo 3. Datos mensuales entre los meses de junio de 2022 a 2023.....	94
Anexo 4. Tasas de incremento de casos de hospitalización en Villavicencio	95
Anexo 5. Índices IPC en Colombia desde 2014 hasta 2022	96
Anexo 6. Criterios de clasificación para las especies seleccionadas	97

Resumen

El presente proyecto de investigación tiene como objetivo valorar los costos económicos ambientales derivados del tratamiento de Infecciones Respiratorias Agudas (IRA) causadas por $PM_{2.5}$ y PM_{10} en el área urbana de Villavicencio, donde se registra una mayor concentración de fuentes móviles. Esto se realiza con el propósito de fomentar la investigación sobre el impacto de contaminantes atmosféricos en la salud de los habitantes de Villavicencio, empleando enfoques de economía ambiental e impulsando la adopción de soluciones basadas en la naturaleza.

Para lograr este objetivo, se llevó a cabo inicialmente la caracterización de los principales puntos atractores de tráfico vehicular en la ciudad de Villavicencio, con el fin de establecer su relación con las concentraciones de $PM_{2.5}$ y PM_{10} en la atmósfera. Posteriormente, se desarrolló una metodología sistemática para calcular los costos de hospitalización asociados con los casos atribuibles de IRA por la inhalación de estos contaminantes.

Las estimaciones realizadas dieron como resultado 169 casos atribuibles por la presencia de $PM_{2.5}$ y PM_{10} en el aire con costos asociados de hospitalización de \$ 1.567.123.945 COP entre el año 2022 y 2023. A partir de esto, se realizaron proyecciones hasta el año 2042 a través de un modelo desarrollado en el software MATLAB, generando costos alarmantes de \$33.402.000.000 COP anuales asociados a 1121 casos atribuibles al material particulado evaluado.

Se diseñó una propuesta, en la cual se busca emplear tres especies arbóreas para reducir las concentraciones de partículas en suspensión. A partir de una revisión bibliográfica y de las especies nativas que enlista el Decreto 1000-24/367 de 2020, se determinó que las especies que tienen la mejor capacidad para retener material particulado fueron *Thuja occidentalis L*, *Ficus benjamina L* y *Jacaranda mimosifolia D. Don*, con una reducción gradual del 3,8% anual en las concentraciones de $PM_{2.5}$ y PM_{10} en la zona urbana de Villavicencio hasta un total del 68% en el año 2042.

Se puede concluir que el municipio de Villavicencio requiere un sistema de monitoreo de calidad del aire adaptado a las necesidades de su población. La carencia de datos y las estimaciones realizadas sobre los costos asociados a los casos atribuibles al $PM_{2.5}$ y PM_{10} son preocupantes. Por tanto, resulta necesario invertir en instrumentos técnicos específicos que conduzcan a beneficios económicos para la ciudad y en la mejora de la salud pública de sus habitantes.

Palabras Clave: Salud ambiental, valoración económica, material particulado, IRA.

Abstract

The objective of this research project is to assess the environmental economic costs derived from the treatment of Acute Respiratory Infections (ARI) caused by $PM_{2.5}$ and PM_{10} in the urban areas of Villavicencio, where a higher concentration of mobile sources is recorded. This is done to promote research on the impact of atmospheric pollutants on the health of Villavicencio's inhabitants, using environmental economics approaches. It seeks to promote adopting nature-based solutions.

To achieve this objective, the characterization of the main vehicular traffic perception points in the city of Villavicencio was initially carried out, to establish their relationship with the concentrations of $PM_{2.5}$ and PM_{10} in the atmosphere. Subsequently, a systematic methodology was developed to calculate hospitalization costs associated with cases of ARI attributable to inhalation of these contaminants.

The estimates made resulted in 169 cases attributable to the presence of $PM_{2.5}$ and PM_{10} in the air with associated hospitalization costs of COP 1.567.123.945 between the year 2022 and 2023. From this, projections were made until the year 2042 through a model developed in MATLAB software, generating alarming costs of COP 33.402.000.000 associated with 1121 cases attributable to the evaluated particulate matter.

A proposal was designed, in which three tree species will be used to reduce the concentrations of suspended particles. Based on a bibliographic review and the native species listed in Decree 1000-24/367 of 2020, it was determined that the species that have the best capacity to retain particulate matter were *Thuja occidentalis* L, *Ficus benjamina* L y *Jacaranda mimosifolia* D. Don, with a gradual 3,8% reduction in $PM_{2.5}$ and PM_{10} concentrations annually in the urban area of Villavicencio until the 68% in the year 2042.

It can be concluded that Villavicencio requires an air quality monitoring system adapted to the needs of its population. The lack of data and the estimates made on the costs associated with cases attributable to $PM_{2.5}$ and PM_{10} are worrying. Therefore, it is necessary to invest in specific technical instruments that lead to economic benefits for the city and the improvement of the public health of its inhabitants.

Key Words: *Environmental health, economic valuation, particulate matter, ARIs.*

1. Introducción

La contaminación del aire es actualmente uno de los problemas ambientales más severos a nivel mundial, afectando directamente la salud humana por la presencia de agentes químicos y material particulado microscópico menor a 10 micras de diámetro en el aire que se respira (Placeres et al, 2006). De acuerdo con Organización Mundial de la Salud (OMS, 2018) nueve de cada diez personas en el mundo inhalan aire contaminado, traducido anualmente en siete millones de muertes por causas directas a la polución. Es por eso, que la OMS le ha pedido a los países que reduzcan esta presencia de material particulado en el aire a valores anuales por debajo de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} y de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$, debido a que estos son de los principales factores de riesgo para la salud humana (Rojas et al, 2020).

Este material particulado y otros contaminantes son inhalados y afectan el aparato respiratorio, pasan a la sangre y alcanzan a todos los órganos. Al penetrar al pulmón causan efectos nocivos para la salud, como las infecciones respiratorias agudas (IRA) las cuales en poblaciones vulnerables como: niños menores de 5 años, personas mayores de 60 años y personas con enfermedades base pueden ser letales (Vargas et al, 2008). Se estima que para el año 2060, las muertes asociadas a la contaminación del aire generarán pérdidas económicas significativas (Organization for Economic Co-operation and Development (OECD), 2016), incluyendo bajas en ingresos laborales estimados en aproximadamente USD 225 mil millones de dólares, según un estudio realizado por Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento (BIRF, 2016).

En Colombia, según el Instituto Nacional de Salud (INS), el incremento en la contaminación del aire está relacionada con 15.681 muertes, en su mayoría por enfermedades pulmonares, el Departamento Nacional de Planeación colombiano estimó que en el año 2021, las complicaciones debido a la alta emisión de contaminantes causa más 8 mil muertes anuales que asocia costos de hasta 12,2 billones de pesos, equivalentes al 1,5% del Producto Interno Bruto (PIB) del país, los cuales fueron destinados para el manejo de síntomas y tratamiento de enfermedades (Ministerio de Salud y Protección Social, 2021). Esto asociado en gran parte por los procesos de combustión y de resuspensión provenientes de las fuentes móviles ya que son estas las causantes del 80,3 % de las emisiones de material particulado (Alfonso, 2023) con un aumento de un 9% de 2021 a 2022 (Gil, 2023) a comparación de las fuentes fijas que aportan el 19,7% de las emisiones (García, 2021).

Las poblaciones vulnerables como los niños con una mayor exposición a la contaminación ambiental presentan mayores riesgos de morbilidad respiratoria, asociado con el incremento de material particulado PM_{10} en la atmósfera, que provocan que entre un 8,3 % y un 12,7% de las consultas de niños menores de 5 años sea por afecciones respiratorias (Hernández et al, 2012). De acuerdo con esto, Álvarez (2022) encontró que el Estado en promedio está invirtiendo \$2447 dólares por hospitalización para infecciones respiratorias agudas (IRA) en niños menores de 5 años. Además de afectar a la población infantil, las repercusiones negativas en la salud pública también se extienden a la población económicamente activa, (Reynaldo & Reynaldo, 2018) expresa que los costos de tratamientos sumados a la disminución de los salarios laborales debido a incapacidades medicas por enfermedades respiratorias agudas impactan significativamente a la población.

En Villavicencio, el crecimiento demográfico ha llevado a un aumento significativo en la cantidad de vehículos, en 2022, se registró el 61,72% de incremento en el parque automotor particular en comparación con 2021 (Periódico del Meta, 2022), siendo este el sector de mayor emisión de material particulado de la ciudad y que para Restrepo (2019) ese factor asociado a un porcentaje de las enfermedades pulmonares de la población. Frente a las Infecciones Respiratorias Agudas (IRA) en 2019, la Secretaría de Salud de Villavicencio identificó un aumento en el número de casos en el período comprendido entre 2005 y 2017, realizando estudios epidemiológicos la Secretaría evidenció una tasa de enfermos que pasó de 17,8 casos por cada 100.000 habitantes en 2016 a 30,4 casos en 2017 a causa del material particulado (Tolosa, 2019). Estos resultados son de relevancia debido a estudios como los de Orellano et al (2020), Leiva et al (2013) y Kermani et al (2022), demuestran que, tanto en exposiciones cortas como prolongadas a partículas finas de menos de 10 micras se ve un aumento en los casos de patologías respiratorias.

En el informe de gestión 2020 en Villavicencio, se identificó que los meses de febrero, marzo y abril presentan niveles más altos de contaminación por material particulado (Corporación para el Desarrollo Sostenible del área de Manejo Especial La Macarena (Cormacarena), 2020) y ante esta situación, se ha vuelto necesario tomar medidas para reducir las emisiones, consideradas como el segundo factor de riesgo en el desarrollo de enfermedades no transmisibles (Organización Mundial de la Salud (OMS), 2022).

Estas acciones de gestión y control están destinadas a promover un saneamiento ambiental que proteja las condiciones de salud pública y prevenga afectaciones a la población. Por eso es

importante realizar trabajos de este tipo, por la relevancia que tienen al identificar las condiciones de saneamiento ambiental presentes en entornos urbanos, especialmente en el contexto del cambio climático, variaciones demográficas y el crecimiento de las ciudades. Estos factores, en última instancia, generan deterioro y problemas que incluyen la contaminación del aire, la cual se asocia directamente con el aumento de enfermedades, particularmente estas patologías respiratorias (Dominici et al, 2006).

Con la importancia que desprende la salud pública, se busca entender los costos económicos derivados del tratamiento de IRA asociados al $PM_{2.5}$ y PM_{10} , ya que para la ciudad de Villavicencio no se encuentran estudios similares, este entendimiento se vuelve importante debido al crecimiento que ha tenido el municipio, pasando de 531.275 habitantes en el 2018 a una población proyectada de 558.299 habitantes para el 2023 (Alcaldía de Villavicencio, 2021), donde el 60,4% desempeñan labores con exposición continua al material particulado en sectores industriales, transporte, minero energético, construcción, reparación de vehículos, entre otros (Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (DANE), 2021), sumado al transeúnte común, vendedores ambulantes y comerciantes en sectores de alto flujo vehicular. Para el año 2019, la secretaria de Salud de Villavicencio registro el incremento de gastos en salud pública por patologías asociadas a enfermedades respiratorias, debido a la contaminación atmosférica (Tolosa, 2019).

En este contexto, surge la necesidad de desarrollar este estudio que permita determinar los costos económicos del sector público-privado en temas de tratamiento de enfermedades respiratorias como las IRA, provocadas por la exposición al material particulado, con el objetivo de informar a los responsables políticos y a los ciudadanos sobre la situación actual en temas de contaminación atmosférica. Dado que la sociedad actual dispone de recursos limitados que asignar, estas valoraciones monetarias sirven para compararlas con inversiones de mitigación, que permitan ser una solución enfocada al desarrollo de estrategias o programas de prevención más no de corrección (Pérez et al, 2009).

La ejecución de este proyecto tiene como objeto valorar los costos económicos ambientales derivados del tratamiento de Infecciones Respiratorias Agudas (IRA) provocadas por material particulado $PM_{2.5}$ y PM_{10} emitidas en áreas urbanas con alto flujo vehicular de Villavicencio, permitiendo así establecer una estrategia viable para su reducción.

2. Objetivos

2.1. Objetivo General

Valorar los costos económicos ambientales derivados del tratamiento de enfermedades respiratorias provocadas por material particulado $PM_{2.5}$ y PM_{10} emitidas por fuentes móviles en el área urbana de Villavicencio.

2.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar el área de estudio analizando la relación de las fuentes móviles con las concentraciones medidas de $PM_{2.5}$ y PM_{10} , determinando su incidencia en el aumento de casos de enfermedades respiratorias.
- Estimar los costos asociados al tratamiento de enfermedades respiratorias relacionadas al número de personas afectadas por emisiones de $PM_{2.5}$ y PM_{10} en el área de estudio.
- Determinar por medio de un modelo econométrico los costos asociados al impacto a la salud pública de los contaminantes $PM_{2.5}$ y PM_{10} generados en zonas con mayor concentración de fuentes móviles en el área de estudio.
- Proponer una estrategia a partir de soluciones basadas en la naturaleza para reducir las concentraciones de material particulado en el área de estudio.

3. Antecedentes

Para conocer el impacto negativo de las partículas contaminantes PM_{10} en la salud humana en el año 2016, en la ciudad de Beijín la cual se caracteriza por ser altamente poblada, se realizó un estudio que buscaba evaluar la influencia de este contaminantes en la ciudad, en donde se combinó los niveles de exposición humana a este contaminante con la función exposición-respuesta y con la relación salud-pérdida económica para evaluar el efecto del PM_{10} en la salud humana de manera cuantitativa en el periodo de 2008 – 2012. Se pudo determinar que el 63,4 % de la población estuvo expuesta a niveles de PM_{10} entre 120 a 130 $\mu g/m^3$, en donde la mortalidad y la morbilidad, generó pérdidas económicas que iban de los 8520 millones de dólares en 2008 a 10.410 millones dólares en 2012. Siendo la siembra de árboles una propuesta para reducir la contaminación atmosférica (Hou et al, 2016).

En tres ciudades de Turquía (Afsin-Elbistan, Kutahya-Tavsanli y Ankara) se llevó a cabo un estudio de valoración económica con el método de valoración contingente en para obtener la disposición a pagar de 1362 encuestados para evitar Enfermedades Respiratorias Agudas (ERA), como patologías de tres días de tos intensa y dolor de garganta. Para ello, se tomó como contaminante de estudio el PM_{10} con el cual se pudo determinar que la mediana de la DAP para evitar ERA se situó en el rango de 51 a 83 USD en el 2012. Se pudo concluir que al reducir los niveles de PM_{10} a los 40 $\mu g/m^3$ como establece la Unión Europea, permite reducir los casos de ERA entre 4 a 11 casos, y en donde las ganancias de bienestar se calcularon en 157 millones para Afsin-Elbistan, 123 millones para Kutahya-Tavsanli y 1464 millones de dólares para Ankara (Ara & Tekeşin, 2016)

Khoshakhlagh et al (2023) desarrollaron un estudio que tenía como objetivo principal caracterizar los cambios espacio-temporales en la concentración de la contaminación del aire en la metrópoli de Teherán, Irán, en donde utilizaron datos entre 2016-2022, de contaminantes atmosféricos estándar incluidos PM_{10} y $PM_{2.5}$. Teniendo en cuenta eso, se obtuvo que las fuentes móviles fueron las principales fuentes de contaminación con el 84%. A partir de esto, se pudo determinar que PM_{10} tuvo una concentración de 9395 ton/año, en donde supero los límites permisibles en todos los 22 distritos de Teherán, siendo uno de los principales causantes de aumentar significativamente el riesgo de EPOC, el cual tiene un costo de tratamiento de \$1.585

USD y el cual le costó a Irán el 3,7% de su PIB en 2018. Con la investigación se pudo demostrar que el costo del tratamiento, la reducción de productividad laboral y las muertes anuales por contaminación atmosférica puede imponer una pesada carga para la economía de las sociedades.

Para el año 2018 en la ciudad de Medellín, Restrepo (2019) desarrollo un estudio, el cual tenía como objetivo general valorar económicamente la afectación de la salud humana, causado por los contaminantes que emiten los camiones a la atmósfera. Como resultados principales a este estudio con una proyección poblacional a 2030 con año base el 2018, se determinó que si no se realiza ningún cambio en la circulación de camiones u otras medidas como cambios tecnológicos, entre otros, las emisiones seguirán aumentando y consigo los costos de hospitalización de IRA con un valor de \$1.851.990.270 para el 2025, es decir, un aumento del 16,2% y \$ 2.038.928.255 para el 2030, aumentando un 23,9 %, teniendo en cuenta los valores presentes de costos. Frente a este panorama, la autora a modo de conclusión recomienda a las diferentes secretarías tener una base de datos actualizados de los aforos de vehículos para futuros estudios de este tipo.

Ciudades como Ibagué, que comparten similitudes demográficas con Villavicencio, también abordan problemas medioambientales, como la contaminación atmosférica, debido a la fuerte presión de las emisiones del parque automotor que ha ido en aumento (Peláez et al, 2010). Por esta razón, en Ibagué se han desarrollado indicadores para evaluar el impacto de la contaminación del aire en la salud. Esto implica un mayor aprovechamiento de las áreas verdes para reducir enfermedades respiratorias y dermatológicas. Estas mejoras también contribuyen a la reducción de los gastos públicos en salud al crear un entorno más saludable (González, 2003).

En Villavicencio, González (2017) realizó un estudio donde se determinó el valor económico y la percepción social de los efectos de la contaminación atmosférica en la salud de los habitantes, así como el seguimiento de políticas de control. Se empleo el método de transferencia de beneficios, obteniendo un valor total DAP de COP \$8.500 millones anuales para disminuir la contaminación atmosférica. Se identificaron 6.318 casos son por afectaciones respiratorias, 36 casos de muerte por IRA anuales, en donde 28.168 casos corresponden a menores de 5 años de los 73.455 casos anuales de IRA. Se presentan los resultados de 400 encuestas realizadas en Villavicencio sobre la percepción social de la contaminación atmosférica. El 60% de la población califico la calidad del aire como regular, y el 59% identificó a las fuentes móviles como la principal causa del problema.

4. Marco Referencial

4.1. Marco Teórico

4.1.1. Método de efecto sitio-dependiente (SDEM Method)

El Método del efecto dependiente del sitio por sus siglas en inglés SDEM es un modelo que integra tanto la información espacial como temporal con el fin de suplir los registros ausentes en una base de datos sobre calidad del aire, cuando supera el 25% de los datos faltantes diarios y resulta imposible calcular la media diaria (Barra, 2019). El método explora de manera explícita los efectos semanales, diarios y horarios (todos dependientes del sitio), asumiendo su combinación lineal (Plaia & Bondi, 2006). Este enfoque permite estimar el valor faltante de manera más precisa.

4.1.2. Efectos en salud y medio ambiente por contaminantes atmosféricos

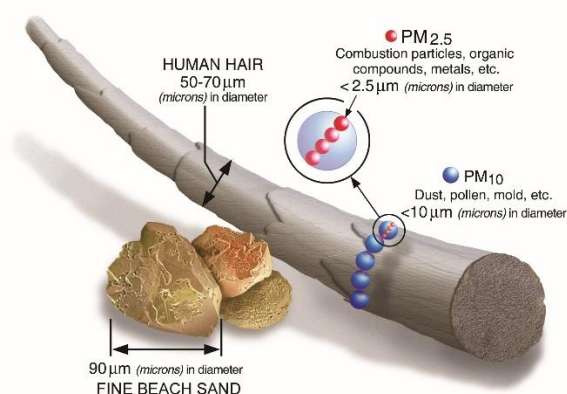
La contaminación atmosférica se presenta cuando elementos contaminantes se encuentran presentes en el aire, afectando su composición normal y afectando a la salud humana (Puerto & Ramírez, 2015). Pueden ser primarios, los cuales permanecen en la atmósfera sin cambiar su composición química, tal como fueron emitidos desde la fuente. En este grupo se encuentran los materiales particulados (PM) (Restrepo, 2019).

Varias investigaciones realizadas a nivel mundial revelan una correlación entre contaminantes en el aire y efectos adversos en la salud humana (OMS, 2022). Uno de los impactos más significativos de la contaminación atmosférica se relaciona con las afecciones pulmonares en las personas (Abidin et al, 2023). En Colombia, se ha identificado que uno de los contaminantes monitoreados que más afecta la salud es el material particulado respirable (PST, PM₁₀ y PM_{2,5}), dado que sus niveles exceden en algunas ciudades los estándares ambientales establecidos en la normatividad vigente (Camacho & Ramírez, 2020).

4.1.3. Exposición aguda a material particulado

De acuerdo con Quijano et al (2010) la contaminación atmosférica por material particulado (PM) es uno de los mayores problemas en la atmósfera, teniendo un origen natural y antropogénico. Este último está relacionado con los residuos de combustión incompleta, procesos industriales, tala de árboles, incineradores de residuos tanto sólidos como hospitalarios y por supuesto la combustión vehicular (Environmental Protection Agency (EPA), 2023a). En la Figura 1, se puede observar la comparación de tamaño del material particulado de acuerdo con la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos por sus siglas en inglés EPA.

Figura 1. Comparación de tamaño de las partículas de material particulado



Nota: Comparación de los tamaños de las partículas contaminantes en la atmósfera. Tomado de Environmental Protection Agency (EPA, 2023b)

Las partículas PM_{10} en su mayoría son el producto de la combustión no controlada; relacionadas con resuspensión de partículas en el ambiente o la desintegración mecánica de la materia, debido a la acción de los vehículos (Rodríguez & Violante, 2018). Están compuestas por sulfatos, nitratos, amonio, cloruro de sodio y carbón negro, los cuales son dañinos para la salud debido que pueden irritar y bloquear las vías bronquiales. Sus efectos sobre la salud tanto a corto como a largo plazo se extienden por diferentes afecciones respiratorias (Aldunate et al, 2006) como el asma, bronquitis crónica, prevalencia de bronquitis y mortalidad neonatal (Fallahizadeh et al, 2021).

El $PM_{2.5}$ son partículas generalmente ácidas, que contienen hollín y otros derivados de las emisiones vehiculares e industriales, y corresponde a la fracción más pequeña y agresiva, ya que estas penetran y se alojan en bronquios, bronquiolos y alvéolos.

4.1.4. Infecciones Respiratorias Agudas (IRA)

Las Infecciones Respiratorias Agudas (IRA) agrupan un variado grupo de enfermedades que comparten el hecho de afectar el sistema respiratorio. Este grupo comprende diversas condiciones clínicas, como el resfriado común, la influenza, otitis media, faringitis, traqueítis, laringitis, epliglotitis, bronquitis, bronquiolitis, neumonía, etc., todas con diferentes causas y grados de gravedad. Como un problema de salud significativo, las IRA representan una preocupación tanto en la infancia como en la vejez, debido a su frecuencia y gravedad (Odo et al, 2022).

4.1.5. Valoración económica de impactos ambientales

La valoración económica del entorno natural desempeña un papel fundamental en la búsqueda del desarrollo sostenible, debido a que se ha convertido en un factor de decisión para las instituciones ambientales en relación con el desarrollo de políticas públicas, en temas como el uso, el manejo, protección y conservación de los ecosistemas (Múnera & Correa, 2004). En las últimas décadas, se ha avanzado en metodologías en temas de valoración económica ambiental, que han ido desarrollado nuevos métodos de acuerdo con las necesidades de la investigación (Carriazo et al, 2003).

4.1.5.1. Métodos para estimar la valoración económica. La evaluación y cuantificación de los impactos en la salud por la contaminación atmosférica involucra dos componentes fundamentales: la estimación de los casos atribuibles a esta problemática y la valoración económica de estos casos. Este enfoque se encuentra en el marco metodológico de las Estrategias Ambientales Integradas realizado para el Valle de Aburrá (Clean Air Institute (CAI), 2013).

Una técnica para determinar la carga de enfermedad atribuible a la contaminación atmosférica es mediante el uso de funciones de concentración-respuesta (FCR), las cuales

establecen la relación entre los cambios en la concentración de un contaminante y las variaciones en los efectos sobre la salud.

Para aplicar esta metodología, es necesario realizar una revisión que permita identificar ciertas variables cruciales para su desarrollo, teniendo en cuenta lo establecido por Ueda (2023).

4.1.5.1.1. Riesgos Relativo. Constituyen el fundamento principal para emplear las FCR, el cual se deriva de análisis epidemiológicos que exploran la relación entre la exposición a un factor de riesgo (antecedentes familiares, contaminación ambiental, cambio climático, edad y factores socio demográficos como la exposición al humo del tabaco, desnutrición, etc.) y variación de un efecto en la salud (Environmental Protection Agency (EPA), 2005). Actualmente existe una muy bien documentada evaluación de la relación que hay entre la exposición a material particulado y la aparición de efectos en la salud pública que impliquen un aumento en casos de la morbilidad atendida, morbilidad sentida y mortalidad (CAI, 2013).

4.1.5.1.2. Fracción Atribuible de la Población (FAP). El FAP estima la fracción de casos de una enfermedad que podrían prevenirse si la exposición al factor de riesgo se eliminará por completo (Fajardo, 2017). Se calcula mediante la comparación de la incidencia de la enfermedad en la población expuesta al factor de riesgo con la incidencia de la enfermedad en la población no expuesta. La FAP es una medida importante en salud pública y epidemiología, ya que ayuda a identificar la magnitud del impacto de un factor de riesgo en la incidencia de una enfermedad y puede proporcionar información valiosa para la prevención y el control de enfermedades (Hernández, 2007).

4.1.5.1.3. Número de casos atribuibles a PM. Es una medida epidemiológica que estima la cantidad de casos de una enfermedad específica que pueden atribuirse a la exposición a partículas suspendidas en el aire, como el PM_{10} o el $PM_{2.5}$. Esta medida se utiliza para evaluar el impacto de la contaminación del aire en la salud pública y puede ayudar a informar sobre políticas y acciones para reducir los efectos adversos de la contaminación del aire en la población (Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2021). El número de casos atribuibles a PM se calcula utilizando la Fracción Atribuible en la Población (FAP) y la incidencia de la enfermedad en la población expuesta a niveles elevados de PM. El número de casos atribuibles a PM

proporciona una estimación de la carga de enfermedad que podría prevenirse si se redujera la exposición a la contaminación del aire (Querol et al, 2012).

4.1.5.1.4. Tasa de incidencia. Se refiere a la frecuencia con la que se presenta un evento de salud en un determinado grupo de la población durante un período específico. Se utiliza para evaluar la frecuencia en la que las enfermedades o afecciones de salud ocurren en una población determinada y es una herramienta importante en la vigilancia de salud pública. Es importante porque permite monitorear la propagación de enfermedades infecciosas o el impacto de agentes ambientales. A partir de esto, se pueden identificar los grupos de población de alto riesgo y desarrollar estrategias para la prevención o reducción de los impactos (Cummings, 2019).

4.1.6. Salud Ambiental

Es una rama de la ciencia que busca comprender las interacciones que existe entre el medio ambiente y como estas pueden llegar a provocar enfermedades o muertes en las personas. Se busca prevenir dichas enfermedades al enfrentar los riesgos ambientales que puedan llegar a afectar las condiciones sociales, entre estos, se encuentra la contaminación atmosférica. Para Gee & Payne (2004), reconoce la influencia de los determinantes físicos, químicos, biológicos y sociales del medio ambiente en la salud, y promueve un enfoque holístico que integra aspectos científicos, sociales y políticos, por eso su importancia. Además, la salud ambiental se preocupa por la prevención de enfermedades tales como las IRA u otras afecciones, la mitigación de riesgos y la promoción de entornos saludables, así como por la justicia ambiental, asegurando un acceso equitativo a un medio ambiente seguro y reduciendo las disparidades en salud entre diferentes comunidades.

4.2. Marco Legal

La normatividad colombiana legal vigentes, que se tuvo en cuenta para esta investigación, se plantea a continuación en la Tabla 1, constituyendo Leyes, Decretos y Resoluciones que establecen métodos, límites permisibles y medidas de control de aspectos ambientales.

Tabla 1. *Normatividad legal vigente para Colombia*

Normativa	Emite	Artículo	Descripción
Constitución Política de 1991	Congreso Nacional de Colombia	79 y 80	Todos los ciudadanos del territorio colombiano tienen como derecho fundamental gozar de un ambiente sano manteniendo buena calidad del aire. Realizando una buena gestión de los recursos naturales.
Ley 99 de 1993	Ministerio de Ambiente	Artículo 5, Numeral 43	Establece la función del Ministerio de establecer metodologías en temas de valoración de costos económicos del deterioro y la conservación del medio ambiente, como sus recursos renovables.
Decreto 1200 de 2004	Ministerio de Ambiente		Determina los instrumentos de planificación ambiental, estableciendo los indicadores mínimos de gestión, ambientales y de impacto que deben considerar las CAR.
Resolución 2154 de 2010	Ministerio de Ambiente		Por el cual se ajusta el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire
Decreto 1076 de 2015	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo		Establece disposiciones sobre la prevención y control de la contaminación atmosférica causada por fuentes fijas y móviles, así como por otras actividades humanas.

Tabla 1. *Continuación*

Decreto 780 de 2016	Ministerio de Salud y Protección Social	Por el cual se expide el Decreto Único Reglamentario del sector Salud y Protección Social.
Resolución 2254 de 2017	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	Establece la norma de calidad del aire o nivel de inmisión y adopta disposiciones para la gestión del recurso aire, para establecer los límites permisibles de emisiones de contaminantes atmosféricos como el PM _{2.5} y PM ₁₀ , así como el rango del Índice de Calidad del Aire (ICA)
Resolución 1035 de 2022	Ministerios de Salud y Protección Social	Aborda una variedad de temas, como la vigilancia epidemiológica, la implementación de medidas de control de infecciones, la promoción de la salud y la prevención de enfermedades, entre otros aspectos relacionados con la salud pública.

Nota: Normativa legal vigente aplicable al presente proyecto

Tabla 2. *Normatividad municipal*

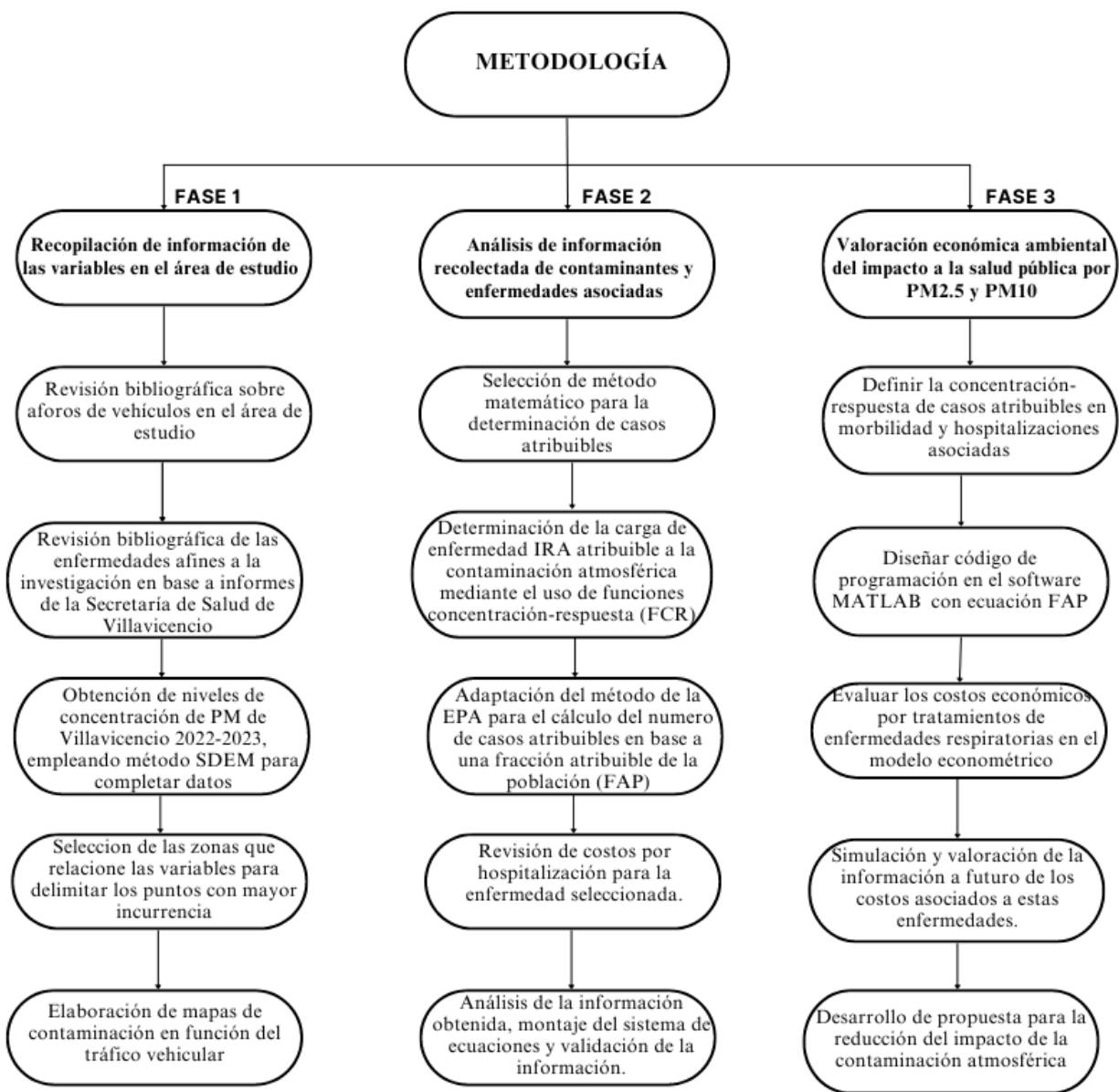
Normativa	Emite	Artículo	Descripción
Decreto 1000- 24/367 de 2020	Alcaldía de Villavicencio		Establece las especies vegetales autorizadas para plantar en las áreas del espacio público de la ciudad de Villavicencio, de acuerdo con las características ecológicas de la región

Nota: Decreto municipal vigente

5. Metodología

A continuación, se presentan las fases planteadas y desarrolladas para el proyecto:

Figura 2. Fases establecidas para el correcto desarrollo del proyecto.



Nota: Fases metodológicas del proyecto

5.1. Fase 1. Recopilación de información de las variables en el área de estudio

Esta fase se realizó para el periodo que comprende los meses desde junio del año 2022 a junio de 2023. Se recopiló información sobre las concentraciones diarias de material particulado PM_{2.5} y PM₁₀ (Kamarehie et al, 2017), así como datos de aforos de tráfico vehicular en la ciudad de Villavicencio, casos de morbilidad y mortalidad asociada con Infecciones Respiratorias Agudas (IRA).

La información de los aforos de tráfico vehicular se obtuvo de un estudio llevado a cabo por la Secretaría de Movilidad, Findeter y la Embajada Británica en Villavicencio durante el año 2022. Se analizó la cantidad de vehículos en la ciudad por tipología vehicular, los de mayor uso, el número total de viajes realizados en un día por cada tipo, cilindraje (un factor relevante en la emisión de material particulado) y su antigüedad. Además, se consideraron los principales puntos de atracción de población para identificar las áreas con mayor concentración de tráfico vehicular.

Para las concentraciones de PM_{2.5} y PM₁₀ se obtuvieron datos a través de la Secretaría de Medioambiente, en relación con un estudio realizado para el Plan de Acción de la Calidad del Aire (PAMCA) durante el período estudiado en los barrios de Catumare y Jordán, en la ciudad de Villavicencio. La información restante se extrajo de la plataforma de SISAIRE para las estaciones de Catumare y Cofrem, en lo que respecta a PM₁₀. Finalmente se identificaron datos de sensores que monitorean PM_{2.5}, situados en la sede de la Universidad Nacional de Colombia (UNAL) en el centro de la ciudad y en la Universidad de los Llanos (Unillanos) en la vereda Barcelona.

Dado que el porcentaje de datos perdidos en las fuentes donde se obtuvieron superaban el 25% de datos faltantes, se utilizó el método SDEM para completarlos (Plaia & Bondi, 2006). Para ello, se siguió el procedimiento descrito por Barra (2019), y se aplicó la Ecuación 1.

Ecuación 1. Método SDEM para datos faltantes de calidad del aire

$$\hat{x}_{sdw} = \bar{x}_{wd} + \frac{1}{2} \left(\bar{x}_{sw} - \sum_{S=1}^S \frac{\bar{x}_{sw}}{S} \right) + \frac{1}{2} \left(\bar{x}_{sd} - \sum_{S=1}^S \frac{\bar{x}_{sd}}{S} \right)$$

Nota: Ecuación para datos faltantes adaptado de Plaia & Bondi (2006)

Considerando la base de datos de calidad del aire para el grupo de estaciones y puntos de monitoreo disponibles para el estudio, cada elemento individual del conjunto de datos se representa

como $\hat{x}_{sdw}$, donde s corresponde a la estación o punto de monitoreo, w indica la semana (variando de 1 a 53 si es un año), d representa el día de la semana (con d variando de 1 a 7). A partir de lo expuesto anteriormente, Plaia and Bondi (2006) establece que el promedio semanal se representa mediante una matriz de dimensiones 53×3 , donde cada elemento $\bar{x}_{sw}$ corresponde a la media de los valores observados durante una semana (w) en una estación determinada (s).

Por otro lado, el valor marginal se obtiene mediante la suma de los promedios semanales de todas las estaciones (promedio marginal), dividido por el número total de estaciones ($\sum_{s=1}^S \frac{\bar{x}_{sw}}{S}$). En este contexto, la diferencia entre $\bar{x}_{sw}$ y el promedio marginal se interpreta como el efecto semanal específico para una estación s .

Asimismo, el promedio diario se representa en una matriz de dimensiones 7×3 , donde cada elemento $\bar{x}_{sd}$ corresponde al promedio de los valores observados para un día (d) de la semana en una estación s . El efecto específico por día de la semana para una estación s se calcula como la diferencia entre $\bar{x}_{sd}$ y el valor marginal por fila ($\sum_{s=1}^S \frac{\bar{x}_{sd}}{S}$).

Con los promedios semanales y diarios definidos para cada estación y punto de monitoreo, se despejaron los valores de la Ecuación 1, teniendo en cuenta el número de la semana (1 a 53) y el día (1 a 7) para ese dato faltante. Se repitió este proceso para cada estación y punto de monitoreo hasta completar la serie de datos de concentraciones de calidad del aire tanto para $PM_{2.5}$ como para PM_{10} .

Completados los datos faltantes, se realizó una representación gráfica de las concentraciones determinadas para cada zona de monitoreo en relación con los principales centros atractores de población, con el propósito de analizar la relación entre el tráfico vehicular y las emisiones de material particulado (Soleimani et al, 2022). Esta representación gráfica se elaboró utilizando el software ArcGIS, dando como resultado un mapa que ilustra dicha relación.

Finalmente, en esta fase, a partir del “Boletín Epidemiológico Consolidado” proporcionado por la Secretaría de Salud para el año 2023 se extrajeron los estudios epidemiológicos del año 2022-2023, que incluyen casos de morbilidad relacionados con hospitalización, ingresos a unidades de cuidados intensivos (UCI) y consultas externas, así como la mortalidad asociada con Infecciones Respiratorias Agudas (IRA) en todos los grupos de edad en Villavicencio.

5.2. Fase 2. Análisis de información recolectada de contaminantes y enfermedades asociadas

Como segunda fase del proyecto se determinó la carga de enfermedad atribuible a la contaminación atmosférica mediante el uso de funciones de concentración-respuesta (FCR), a partir de la relación entre los cambios de la concentración de $PM_{2.5}$ y PM_{10} y las variaciones en los efectos sobre la salud (Priyankara et al, 2021). Para determinar la función de concentración-respuesta, se realizó una revisión bibliográfica de estudios epidemiológicos para poder determinar el coeficiente de contaminación (β) requerido para calcular el Riesgo Relativo (RR), teniendo en cuenta las concentraciones determinadas en la Fase 1. Utilizando la Ecuación 2.

Ecuación 2. *Cálculo Riesgo Relativo*

$$RR = e^{(\beta * \Delta C)}$$

Donde RR es el riesgo relativo a nivel correspondiente de las partículas contaminantes del aire que se deriva del FCR y β es el coeficiente de contaminación para un cambio de concentración de $PM_{2.5}$ y PM_{10} en $\mu g/m^3$ (Pérez et al, 2009).

Para estimar la Fracción Atribuible de la Población (FAP) que se ve afectada por las concentraciones de $PM_{2.5}$ y PM_{10} , se utilizó la Ecuación 3.

Ecuación 3. *Cálculo FAP*

$$FAP = \frac{RR - 1}{RR}$$

Donde FAP es la Fracción Atribuible de la Población afectada por la presencia de $PM_{2.5}$ o PM_{10} en el aire y RR es el riesgo relativo (Ueda, 2023). Con el FAP calculado, se empleó la Ecuación 4, donde se multiplicó este valor con los casos identificados de IRA para cada grupo de edad, dando como resultado los casos atribuibles de IRA por $PM_{2.5}$ y PM_{10} .

Ecuación 4. *Número de casos atribuibles*

$$N_{PM} = N_{Total} * FAP$$

Donde N_{PM} es el número de casos atribuibles a $PM_{2.5}$ o PM_{10} , N_{Total} son el número total de casos de morbilidad/mortalidad de IRA y FAP es la Fracción Atribuible de la Población. Con los casos atribuibles identificados se calculó su incidencia sobre una población de 100.000 habitantes, esto para estimar la frecuencia con la que pueden presentar nuevos casos asociados con la presencia de $PM_{2.5}$ y PM_{10} en el aire. Para ello se empleó la Ecuación 5 establecida por la (Alcaldía de Villavicencio, 2023).

Ecuación 5. Cálculo Tasa de Incidencia

$$Tasa\ de\ incidencia = \frac{Total\ de\ casos\ notificados\ confirmados}{Población\ en\ riesgo} * 100.000$$

Una vez esta tasa es calculada, se procede al cálculo de valor futuro mediante los gastos para casos por hospitalización de IRA, se determinaron a partir de lo realizado por Bernal et al (2017) en donde se tomaron los costos identificados por esta fuente y se aplicó la inflación anual (índice IPC) definida por el DANE hasta el año 2022 (ver Anexo 5) teniendo en cuenta la Ecuación 6, la cual se tomó de Newnan et al (2004).

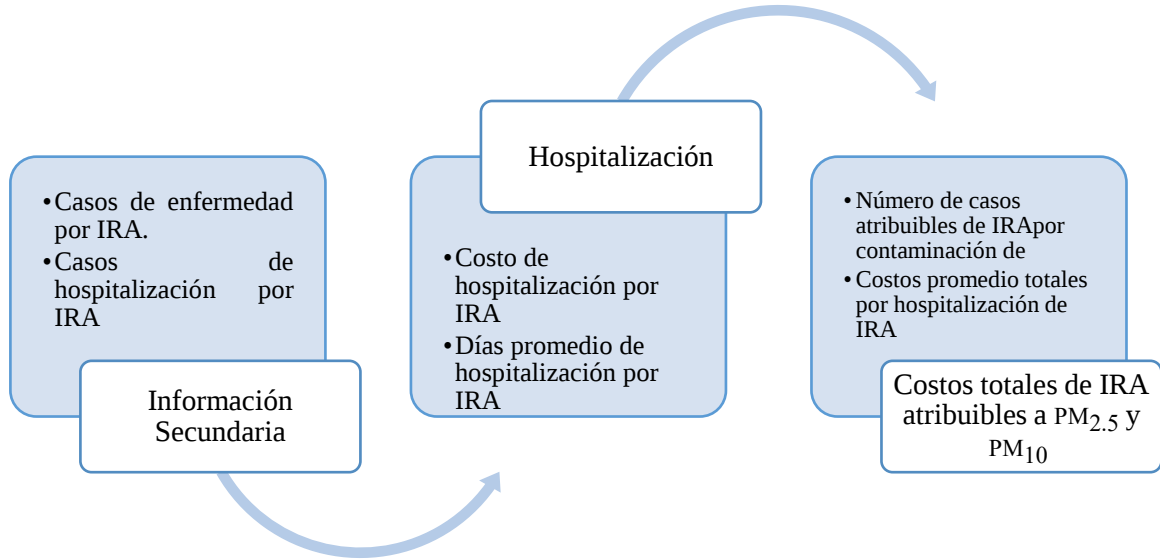
Ecuación 6. Cálculo del valor futuro

$$F = P (1+i)^n$$

Donde F es el valor futuro, i es la tasa de inflación y n es el tiempo establecido (años) con el cual reúne el aumento de los precios de bienes y servicios en el periodo de tiempo establecido permitiendo conocer el valor real a la fecha de los costos aterrizando a un valor real.

5.3. Fase 3. Valoración económica ambiental del impacto a la salud pública

Una vez definida la relación entre la morbilidad de la población y la contaminación por $PM_{2.5}$ y PM_{10} se estimaron los costos asociados a dicha contaminación, siguiendo la Figura 3.

Figura 3. Procedimiento para la valoración económica

Nota: Procedimiento realizado para determinar los costos por hospitalización de casos atribuibles por PM_{2.5} y PM₁₀ de IRA. Elaboración propia a partir de lo realizado por Restrepo (2019).

Para estimar los costos, en primer lugar, se emplearon los casos atribuibles calculados de Infección Respiratoria Aguda (IRA), obtenidos a partir de la información secundaria recopilada de la Secretaría de Salud y la plataforma SIVIGILA. Se determinaron los días promedio de hospitalización de individuos con IRA, mediante una revisión bibliográfica, y se tomaron los costos con la inflación aplicada, estimando los costos tal como lo hizo Restrepo (2019). Todos estos datos fueron reemplazados en la Ecuación 7 para su análisis.

Ecuación 7. Estimación costos casos atribuibles

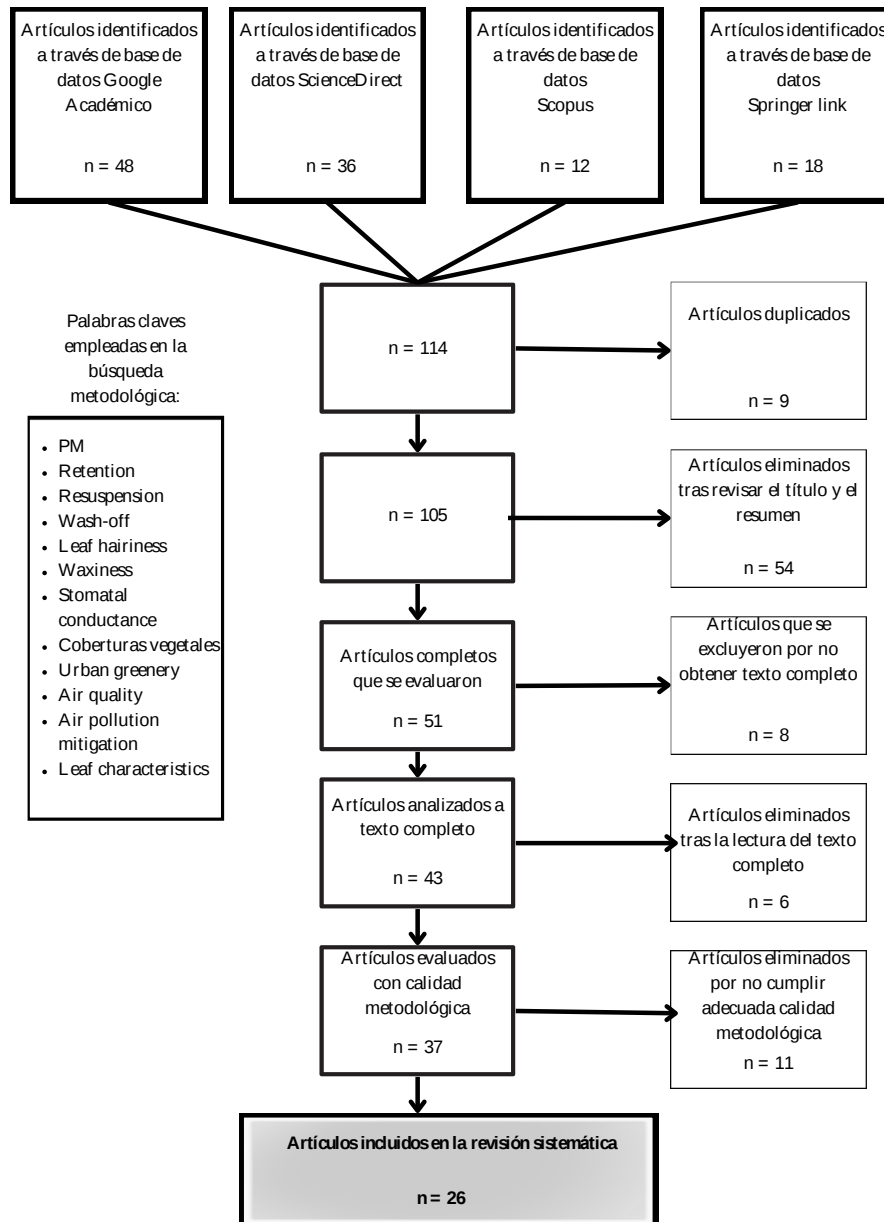
$$C_{hospPM} = N_{PM} * N_{dhosp} * C_{hosp}$$

Donde C_{hospPM} es el costo estimado de hospitalizaciones de IRA por casos atribuibles a PM_{2.5} o PM₁₀, N_{PM} es el número de casos atribuibles a PM_{2.5} o PM₁₀, N_{dhosp} es el número de días promedio de hospitalización por IRA y C_{hosp} es el costo de un día de hospitalización con la inflación aplicada.

A partir del procedimiento establecido para determinar los costos, se diseñó un código de programación en el software MATLAB, utilizando la ecuación de *FAP*. El código permitió

proyectar las estimaciones de los costos para un periodo definido hasta el año 2042, teniendo en cuenta la inflación promedio desde el año 2014 hasta el año 2023, además, del crecimiento de los casos de hospitalización entre los años 2016 a 2020 en la ciudad de Villavicencio. Las proyecciones permiten estimar el impacto a la salud pública por el crecimiento de los casos atribuibles por $PM_{2.5}$ y PM_{10} en la ciudad, debido al aumento de las concentraciones de este contaminante estableciendo una relación con el incremento de tráfico vehicular de la ciudad.

A partir de la información resultante, se desarrolló una propuesta a partir de soluciones basadas en la naturaleza para poder reducir la exposición al material particulado de la población y así reducir los costos asociados de afecciones pulmonares por estas concentraciones. De acuerdo con lo realizado por Lindén et al (2023), se hizo una revisión sistemática de literatura para comprender los beneficios de la vegetación y su influencia a la hora de promover la retención de material particulado, donde se tuvo en cuenta la problemática principal, con el objetivo de solucionar y dar una alternativa para la ciudad de Villavicencio en cuanto a cómo reducir la carga contaminante en las calles y sectores donde la población está más expuesta, para esto se realizó en base a palabras claves como las de *retención de material particulado*, *deposición*, *lavado*, *vegetación*, *calidad del aire*, *efecto de material particulado*, *coberturas vegetales*, *hojas y sus características*, etc. Como se aprecia en la Figura 4.

Figura 4. *Revisión sistemática de literatura para la propuesta*

Nota: Procedimiento realizado para selección de artículos viables para la revisión sistemática de la propuesta para la disminución de material particulado en la ciudad de Villavicencio.

Esta revisión se realizó en diferentes bases de datos organizando una tabla didáctica donde se encuentra la información de cada uno de los artículos relacionados y si su interés está en solucionar

la problemática mencionada se realiza un pequeño resumen extraíble a datos puntuales e información que se fue redactando en la propuesta de revegetalización.

Conociendo las especies que más capturan material particulado, se implementarán aquellas que por su capacidad de retención, deposición y captación aparecen en el listado de especies autorizadas para sembrar en el área urbana de Villavicencio establecidas en el Decreto 1000-24/367 de 2020, teniendo en cuenta su repetitividad en los artículos de investigación revisados.

Finalmente, se llevó a cabo una simulación en el software MATLAB utilizando el código previamente diseñado, a la misma proyección de tiempo (año 2042) pero esta vez con el objetivo de determinar el impacto que la implementación de esta propuesta generaría en la reducción de los casos atribuibles y costos asociados debido a los cambios en las concentraciones de $PM_{2.5}$ y PM_{10} gracias a la retención, deposición y lavado de esta supuesta revegetalización.

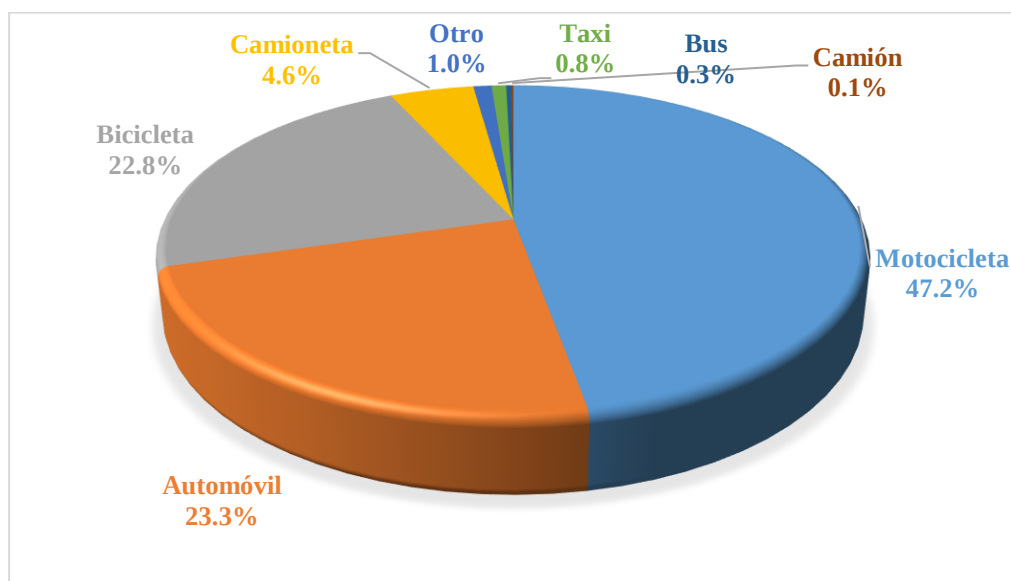
6. Análisis y discusión de resultados

6.1. Fase 1. Recopilación de información de las variables en el área de estudio

6.1.1. Zonas de mayor índice de tráfico vehicular

6.1.1.1. Caracterización vehicular. Basándose en los datos recopilados de la Secretaría de Movilidad de Villavicencio, se ha podido identificar la tipología de vehículos que reportaron los hogares en la ciudad durante el año 2022. Estos datos se obtuvieron a través de aforos y encuestas llevadas a cabo por dicha entidad en colaboración con la Embajada Británica y Findeter (Alcaldía de Villavicencio, 2022), como se detalla en la Figura 5.

Figura 5. Distribución por tipología vehicular



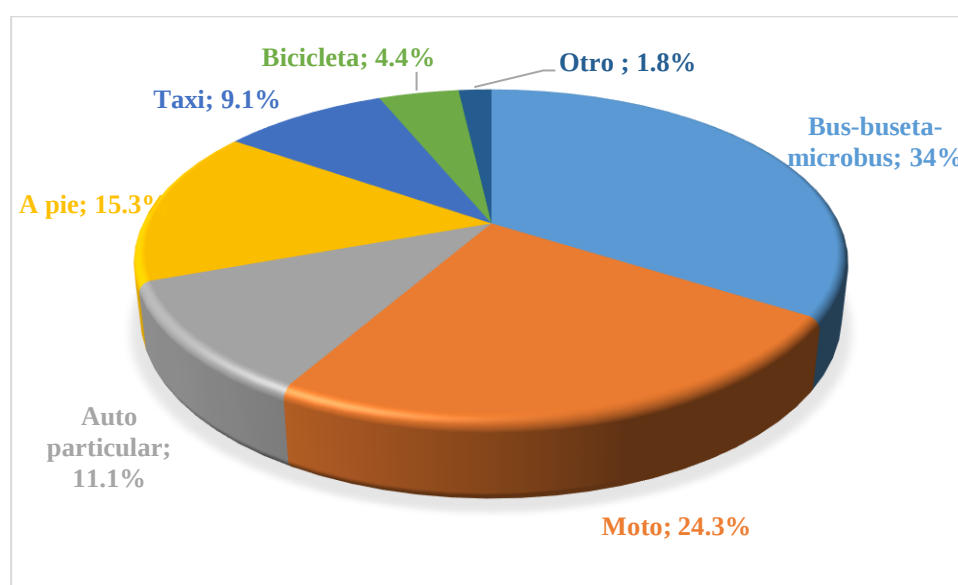
Nota. Distribución porcentual para cada tipo de vehículo reportado por los hogares en la ciudad de Villavicencio para el año 2022. Elaboración propia a partir de datos de la (Alcaldía de Villavicencio, 2022)

En la Figura 5, se observa la distribución de los vehículos reportados por los hogares en la ciudad de Villavicencio, a partir de una encuesta realizada a una muestra poblacional de 2.387 personas, definidas bajo el supuesto de la proporción de personas de un hogar que viajan diariamente (Alcaldía de Villavicencio, 2022). De acuerdo con esto, se determinó que las motocicletas son el medio de transporte que más reportaron en los hogares con el 47,2%, seguido

por los automóviles con el 23,3%, las bicicletas con el 22,8% y en último lugar con el 1,1 % el transporte público conformado por buses y taxis.

Aunque las motocicletas son el medio de transporte más comúnmente adquirido por los habitantes de Villavicencio, su prevalencia no se refleja en su uso. Este fenómeno se evidencia al observar que los buses, busetas y microbuses urbanos superan a las motocicletas en términos de frecuencia de uso. Teniendo en cuenta esto, en la Figura 6 se encuentra la distribución porcentual de los medios de transporte más utilizados en Villavicencio para el año 2022.

Figura 6. Medio de transporte más utilizado



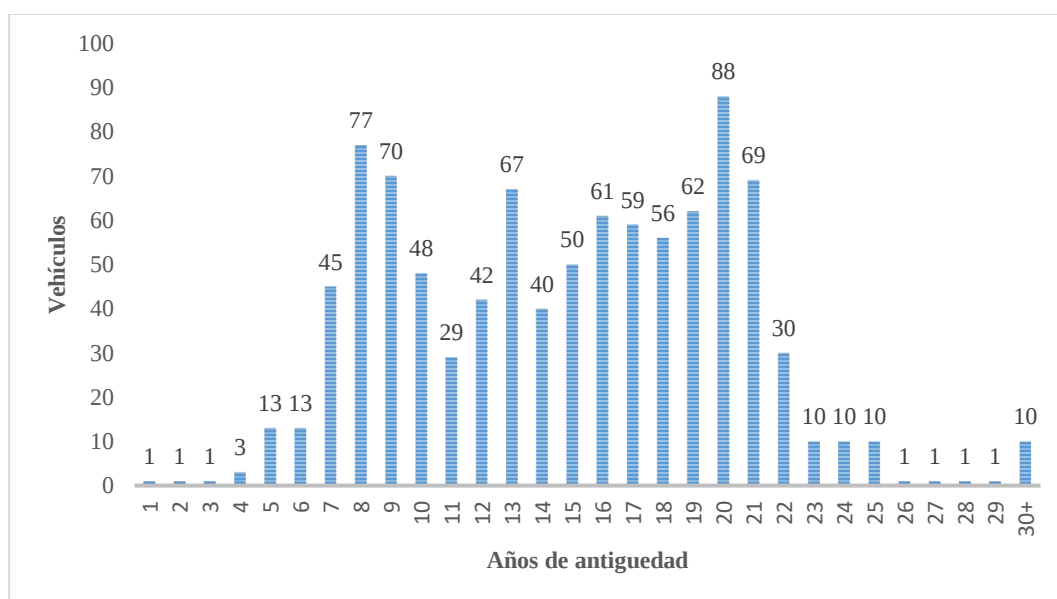
Nota. Distribución porcentual del medio de transporte más utilizado en la ciudad de Villavicencio para el 2022. Elaboración propia a partir de datos recopilados de la Alcaldía de Villavicencio (2022).

En la Figura 6, se observa la distribución porcentual de los medios de transporte más utilizados por las personas en Villavicencio, de acuerdo con información recopilada de los encuestados. De acuerdo con esto, el bus/buseta/microbús urbano pertenecientes al Transporte Público Colectivo (TPC) es el más utilizado con el 34%, seguido por la motocicleta con el 24,3%. En la categoría de “Otro” se tuvieron en cuenta medios de transporte como el bus interurbano, el vehículo empresarial o de institución educativa, vehículos de plataformas digitales como el Uber o InDriver, mototaxis o motocarros, que tuvieron participaciones muy bajas en los encuestados (Alcaldía de Villavicencio, 2022).

La composición del parque automotor de TPC se caracteriza principalmente por la presencia de vehículos tipo Microbús con 526 vehículos, que representan el 54%, seguidos por las Buseta con un 45% (438 vehículos) y finalmente los vehículos tipo Bus constituyen tan solo el 1% del total, equivalente a 4 unidades. Respecto al tipo de combustible utilizado, el 98% de los vehículos funcionan con Diésel, mientras que solo 17 de los 968 vehículos registrados utilizan gasolina y 4 vehículos emplean GNV. Con relación al tamaño del motor, el 74 % de los vehículos poseen un cilindraje que oscila entre 2700 a 3500 cm^3 (Alcaldía de Villavicencio, 2022).

Las edades de los vehículos del parque automotor de TPC se presentan en la Figura 7, de acuerdo con la recopilación de información realizada por Alcaldía de Villavicencio (2022).

Figura 7. Distribución de la flota de vehículos de TPC por edad



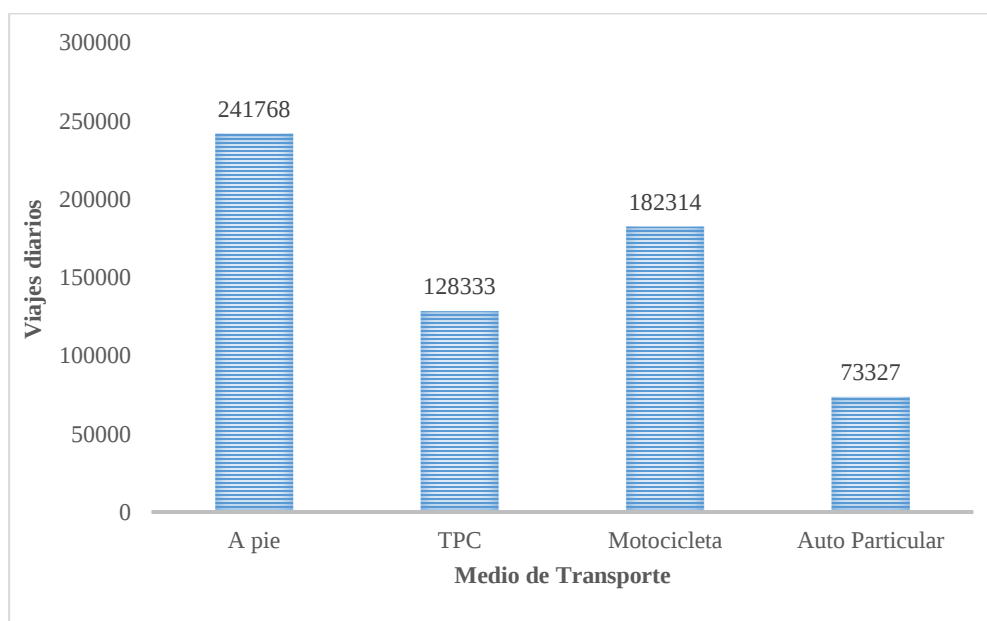
Nota. Cantidad de vehículos de TPC clasificados por su antigüedad en años para el año 2022 en la ciudad de Villavicencio. Elaboración propia a partir de la información de Alcaldía de Villavicencio (2022)

En la Figura 7 se presenta la distribución de la flota de buses y busetas en la ciudad de Villavicencio según su antigüedad. La edad promedio de todo el parque automotor de TPC es de 15 años, una cifra que se sitúa dentro de los límites establecidos de emisión de material particulado, por debajo de 50 mgPM/km (Agudelo, 2017). Sin embargo, se observa que hay un número considerable de vehículos con más de 20 años de antigüedad (15%), e incluso se encuentran en circulación vehículos con hasta 57 años de antigüedad, lo cual genera preocupación ya que estos vehículos superan emisiones de hasta 300 mgPM/km (Agudelo, 2017).

De acuerdo con la Alcaldía de Villavicencio (2022), la edad promedio de las busetas es 4 años mayor que la de los microbuses. Además. Se destaca que las busetas tienden a tener un mayor cilindraje y, en consecuencia, generan mayores emisiones. Esta situación se agrava al considerar que 49 vehículos han excedido su vida útil, como se evidencia en la Figura 7. Se proyecta que, en los próximos diez años, más de 365 de estos vehículos deberán ser retirados de circulación debido a su antigüedad y al alto nivel de emisiones que generan.

Por otro lado, el comportamiento de viajes diarios realizados por transporte en el municipio de Villavicencio se presenta en la Figura 8.

Figura 8. Total de viajes diarios por medio de transporte en Villavicencio



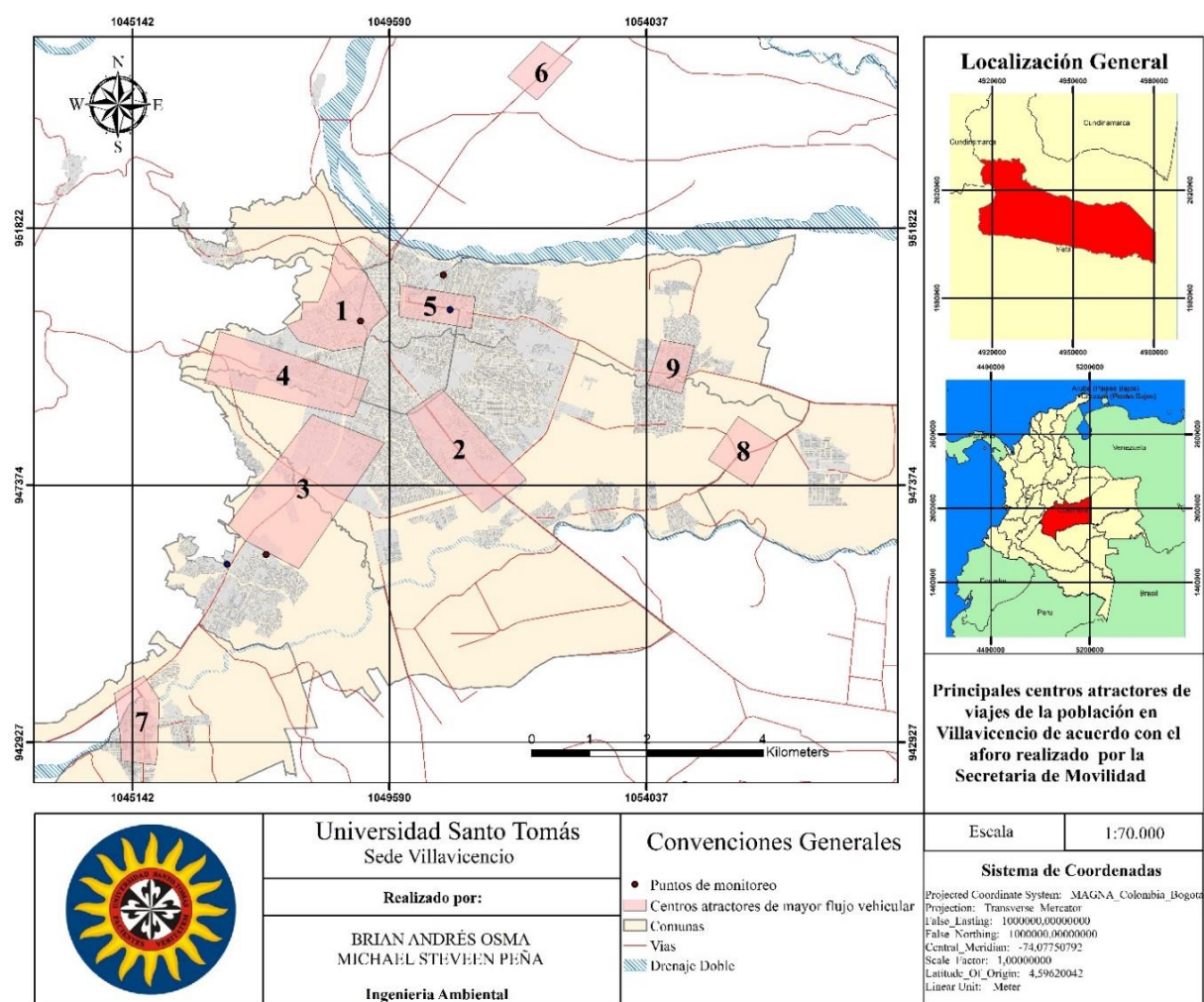
Nota. Cantidad de viajes totales diarios realizados por medio de transporte en la ciudad de Villavicencio para el año 2022. Elaboración propia a partir de Alcaldía de Villavicencio (2022)

La Figura 8, muestra claramente que, durante el proceso de recolección de datos en el año 2022, las motocicletas fueron el medio de transporte más utilizado totalizando 182.314 viajes diarios. Según los datos tomados de la Alcaldía de Villavicencio (2022), se observó que entre las 5:45 y 6:45 horas se registró la mayor concentración de viajes, con el 15,9%, equivalente a 28.988 viajes. En ese mismo período, los autos particulares también experimentaron un alto volumen de desplazamientos, con el 15,6% del total diario, correspondiente a 11.439 viajes. Estos resultados

indican que en la mañana se alcanzan los picos máximos de viajes en los tres principales grupos de medios de transporte, mientras que en la tarde se observó un comportamiento más estable.

Teniendo en cuenta lo anterior, se pudieron definir las zonas con mayor afluencia vehicular, basándose en los viajes realizados por la población a ciertas áreas de la ciudad. En la Figura 9, se puede observar los nueve centros de atractores de la población identificados, a partir del aforo realizado.

Figura 9. Principales centros atractores de viajes de la población en Villavicencio



Nota. Identificación de los principales centros atractores de la población en la ciudad de Villavicencio para el año 2022. Elaboración propia a partir de Alcaldía de Villavicencio (2022)

De acuerdo con la Figura 9, es el centro de la ciudad, los barrios ubicados al sur occidente y suroriente, los principales centros atractores de la población, demostrado por la cantidad de viajes que llegan a estas zonas. Esta situación se presenta, debido a que son zonas caracterizadas por ser los principales destinos por desplazamientos de trabajo, estudio, trámite o diligencias, salud, actividades culturales o religiosas, deportes y recreación, tal como sucede en las zonas uno, dos, tres, cuatro y cinco (ver Anexo 1).

Identificar los principales centros de atracción de la población en Villavicencio puede llevar a diversas problemáticas, como la congestión del tráfico, la contaminación del aire, el ruido, los accidentes de tráfico y como consecuencia el impacto negativo en la salud pública. Estas áreas generan congestión en las carreteras y emisiones contaminantes (como el PM), afectando a la calidad de vida de los residentes y a la sostenibilidad urbana. Se requieren intervenciones de planificación urbana y gestión del transporte para abordar estas problemáticas y promover un entorno urbano más saludable y sostenible.

6.1.2. Emisiones por contaminante atmosférico

6.1.2.1. Material particulado inferior a 10 micrómetros (PM_{10}). Considerando los datos faltantes de las concentraciones de material particulado PM_{10} , se utilizó el método SDEM Method para completar la información faltante en los seis puntos de monitoreo seleccionados. Estos puntos incluyeron dos estaciones del SVCA en la ciudad de Villavicencio (Catumare SISAIRE y Cofrem SISAIRE), los dos puntos de monitoreo designados para el Plan de Acción Local para Mejorar la Calidad del Aire de Villavicencio (PAMCA) en los barrios de Catumare y Jordán, así como los dos sensores de la Red de Calidad del Aire de la ciudad (Sensor Unillanos y Sensor UNAL). La Tabla 3, muestra los porcentajes de datos perdidos en relación con las concentraciones de PM_{10} de los seis puntos mencionados.

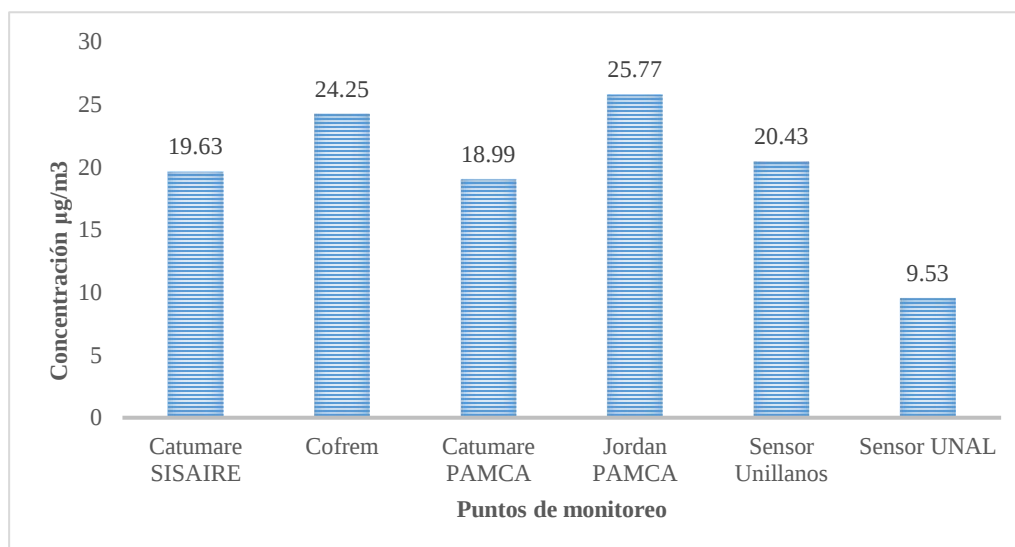
Tabla 3. *Porcentaje de datos perdidos de PM_{10}*

Punto de monitoreo	Datos perdidos (%)
Catumare SISAIRE	39,62
Cofrem	67,92
Catumare PAMCA	24,53
Jordán PAMCA	22,64
Sensor Unillanos	54,72
Sensor UNAL	92,45

Nota. Porcentaje de datos perdidos de PM_{10} por punto de monitoreo en la ciudad de Villavicencio entre los meses de junio del año 2022 al 2023, definidos a partir de los datos recopilados del SISAIRE e información brindada por la Secretaría de Ambiente.

Al analizar los porcentajes de datos faltantes se pudo observar que en cuatro de los seis puntos de monitoreo se superó 25% de ausencia de datos durante en el periodo de junio de 2022 a 2023. El sensor UNAL localizado en el centro de la ciudad de Villavicencio presento el porcentaje más alto de datos faltantes de concentración de PM_{10} con el 92,45%, seguido por la estación de Cofrem (54%) y el Sensor de la Unillanos (54,72%), razón por la cual se utilizó el SDEM Method, para poder completar la serie de datos anual. La imputación individual de los datos fue posible de realizar, teniendo en cuenta que cerca de la zona del sensor UNAL se encontraban el punto de monitoreo de Jordán PAMCA y la estación Cofrem. En el Anexo 2, se pueden observar los valores de efecto sitio-dependiente por semana y por día empleados en la Ecuación 1, la cual para este caso no se usó la hora, debido a que la mayoría de los datos se encontraban en promedio diario.

En la Figura 10 se observa el promedio anual de las concentraciones de PM_{10} obtenidas para los seis puntos de monitoreo a partir de los datos completados con el SDEM Method.

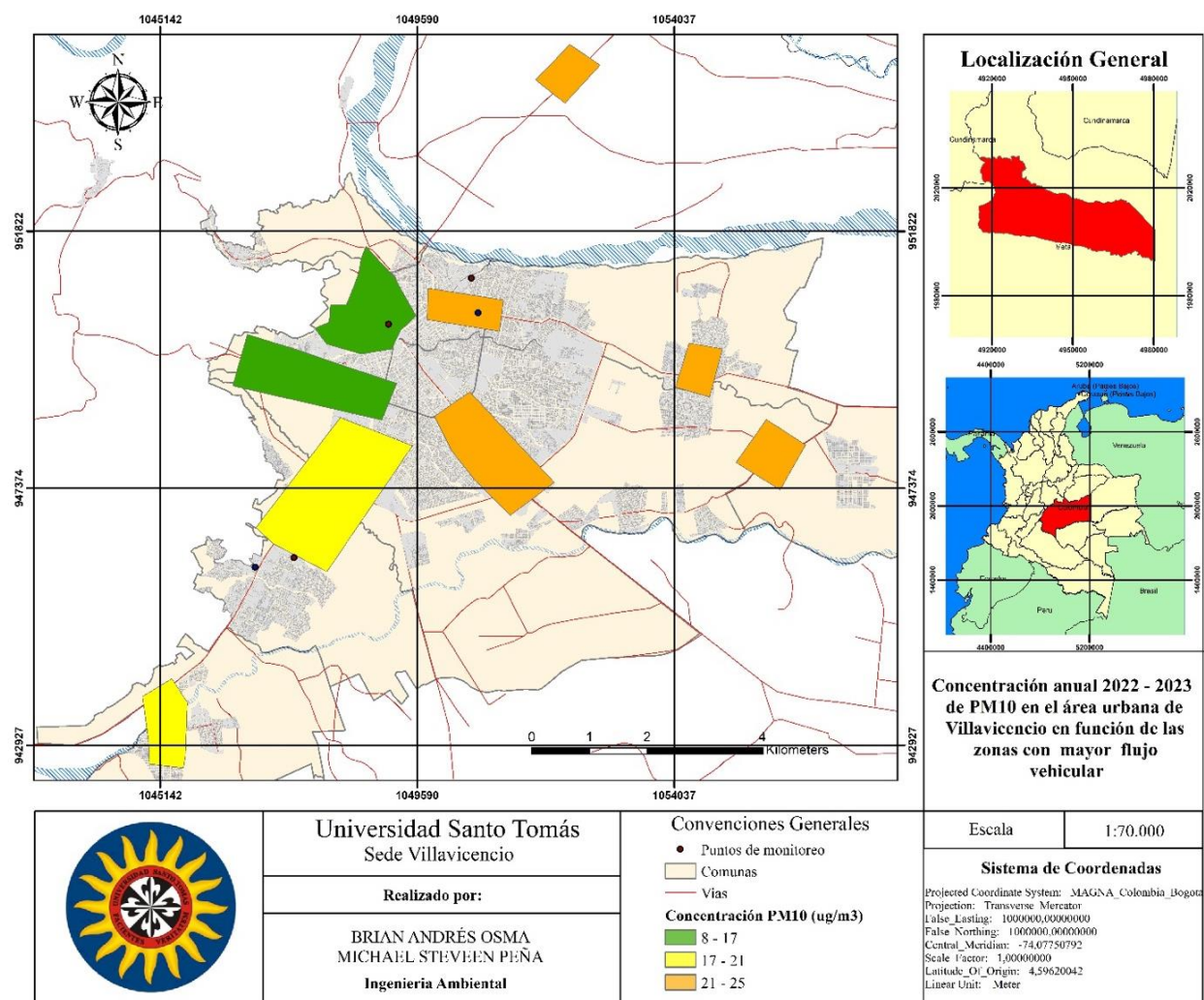
Figura 10. Promedio anual PM_{10} en los seis puntos de monitoreo

Nota. Promedios anuales de PM_{10} por punto de monitoreo en la ciudad de Villavicencio entre los meses de junio del año 2022 al 2023 a partir de los datos recolectados de SISAIRE y Alcaldía de Villavicencio (2023)

Retomando los valores que la OMS sugiere como límites máximos de PM_{10} , tres de las seis estaciones supera este límite como se observa en la Figura 10, el promedio anual de las concentraciones de PM_{10} en los seis puntos de monitoreo seleccionados se destaca que el punto monitoreo Jordán PAMCA registró la concentración más elevada, alcanzando los $25,77\mu\text{g}/\text{m}^3$. Esta situación puede atribuirse a la condición de esta zona como un centro de atracción poblacional significativo, especialmente en términos laborales, ya que alberga la zona industrial de la ciudad, caracterizada por la presencia, de carboneras, bodegas para el almacenamiento de residuos peligrosos y de manejo especial (RH y RESPEL), así como talleres de vehículos (Alcaldía de Villavicencio, 2023). Es relevante señalar que ninguna de las estaciones superó el nivel máximo permisible anual establecido en la Resolución 2254 de 2017, que fija un límite de $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ (ver Anexo 3). Esta situación se repitió con el promedio anual de concentración determinada para la ciudad de Villavicencio, que se situó en $19,77\mu\text{g}/\text{m}^3$, con un cambio en las concentraciones promedio entre los puntos de monitoreo de $6,28\mu\text{g}/\text{m}^3$ para el periodo establecido. Sin embargo, es crucial tener en cuenta que, según Laden et al (2000) incluso en concentraciones bajas de partículas respirables ($20\mu\text{g}/\text{m}^3$), persisten riesgos potenciales para la salud, como las Infecciones Respiratorias Agudas (IRA) y episodios asmáticos.

En la Figura 11, se presentan las concentraciones de PM_{10} obtenidas en los principales centros atractores para la población en la ciudad de Villavicencio. Estos puntos se caracterizan por su elevado tráfico vehicular, lo que se refleja en las mayores concentraciones de PM_{10} registradas.

Figura 11. Concentraciones de PM_{10} entre junio de 2022 y 2023



Nota. Identificación de las concentraciones anuales 2022 y 2023 de material particulado inferior a 10 micras dentro del área urbana de Villavicencio. Elaboración propia en el software ArcGIS

La importancia de mantener los niveles de material particulado PM_{10} bajo en el área urbana de Villavicencio radica en proteger la salud y el bienestar de sus habitantes. El PM_{10} , compuesto por partículas pequeñas de 10 micras o menos, puede tener graves efectos en la salud respiratoria de las personas cuando se inhalan. Estas partículas pueden penetrar profundamente en los pulmones

y llegar al torrente sanguíneo, causando una serie de problemas de salud, como irritación de las vías respiratorias, exacerbación de enfermedades respiratorias preexistentes (como el asma y la bronquitis) e incluso cáncer de pulmón (Vásquez et al, 2022)

La emisión de PM_{10} por los vehículos, motocicletas, buses y busetas, puede variar significativamente dependiendo de varios factores, incluyendo el tipo de combustible, la tecnología del motor, y las condiciones de conducción. Sin embargo, se puede proporcionar una estimación generalizada basada en el cilindraje del motor. Por ejemplo, se estima que los vehículos con motores a gasolina emiten alrededor de 0,0025 a 0,0045 gramos de PM_{10} por kilómetro recorrido. Los vehículos diésel tienden a emitir cantidades mayores de PM_{10} , con valores que pueden oscilar entre 0,02 y 0,05 gramos por kilómetro recorrido (Nam et al, 2008). En términos generales, los vehículos con motores de mayor cilindraje tienden a emitir más PM_{10} que aquellos con motores de menor cilindraje, debido a que requieren más combustible y, en algunos casos, utilizan tecnologías de emisión menos avanzadas.

Es importante tener en cuenta que estas son estimaciones generales y que las emisiones reales pueden variar dependiendo de una serie de factores, incluyendo las condiciones de mantenimiento del vehículo, el estilo de conducción y las características del combustible utilizado (Nam et al, 2008).

Los resultados de la identificación de las concentraciones anuales de PM_{10} entre 2022 y 2023 en Villavicencio que se observa en la Figura 11, proporciona información crucial sobre el estado de la calidad del aire en la ciudad y alertar sobre la necesidad de tomar medidas para reducir la contaminación atmosférica en zonas como Jordán, Kirpas y Covisan.

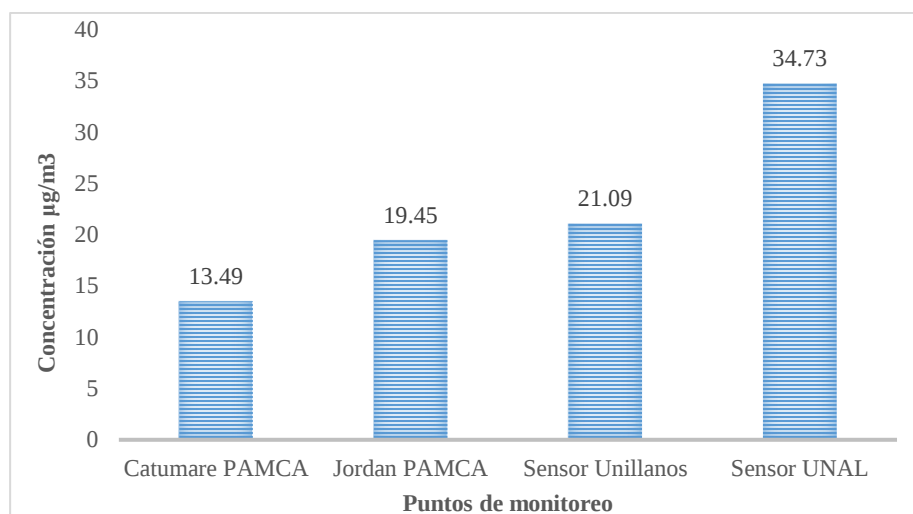
6.1.2.2. Material Particulado inferior a 2.5 micrómetros ($PM_{2.5}$). En la Tabla 4 se muestra el porcentaje de datos perdidos de los cuatro puntos de monitoreo seleccionados para el contaminante $PM_{2.5}$ en la ciudad de Villavicencio entre los meses de junio del año 2022 al 2023.

Tabla 4. *Porcentaje de datos perdidos de $PM_{2.5}$*

Punto de monitoreo	Porcentaje datos perdidos (%)
Catumare PAMCA	24,53
Jordán PAMCA	22,64
Sensor Unillanos	52,83
Sensor UNAL	77,36

Nota. Porcentaje de datos perdidos de $PM_{2.5}$ por punto de monitoreo en la ciudad de Villavicencio entre los meses de junio del año 2022 al 2023, definidos a partir de los datos recopilados del SISAIRE e información brindada por la Secretaría de Ambiente.

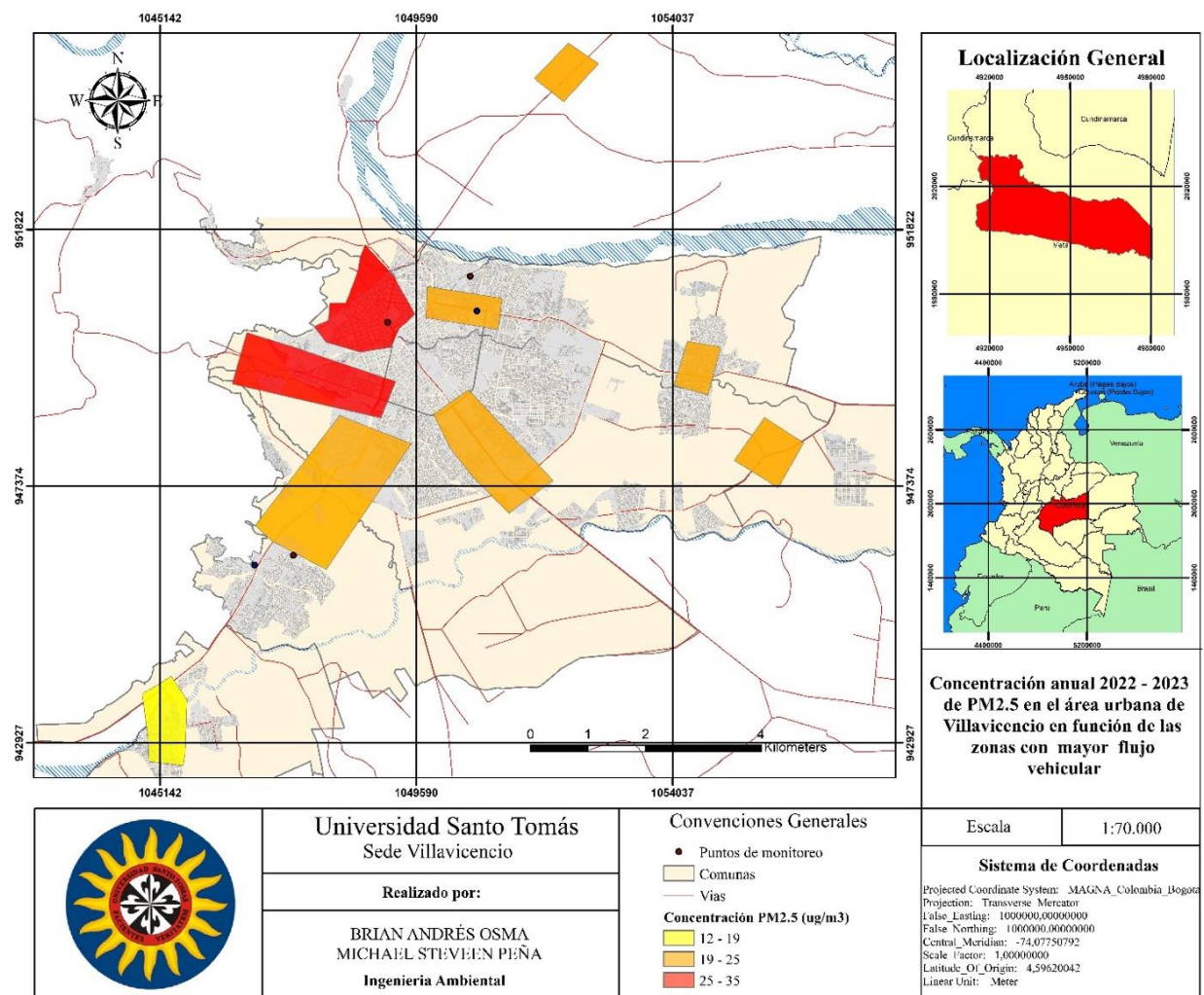
Al analizar los porcentajes de datos ausentes, se evidenció que dos de los cuatro puntos de monitoreo excedieron el 25% de ausencia durante el periodo de junio de 2022 a 2023. Específicamente, el sensor UNAL, ubicado en el centro de la ciudad de Villavicencio, registró el porcentaje más alto de datos faltantes de concentración de $PM_{2.5}$, alcanzando un 77,36%, seguido por el Sensor de Unillanos con un 52,83%. Esta situación motivo la aplicación del SDEM Method, para completar la serie de datos anuales, generando los valores de efecto sitio-dependiente por semana y día requeridos para la Ecuación 1, los cuales se encuentran detallados en el Anexo 2. Después, con los datos diarios calculados, se determinaron los promedios anuales para cada punto de monitoreo, cuya representación gráfica se observa en la Figura 12.

Figura 12. Promedio anual $PM_{2.5}$ en los cuatro puntos de monitoreo.

Nota. Promedios anuales de $PM_{2.5}$ por punto de monitoreo en la ciudad de Villavicencio entre los meses de junio del año 2022 al 2023 a partir de los datos recolectados de SISAIRE y Alcaldía de Villavicencio (2023)

Retomando los valores que la OMS sugiere como límites máximos de $PM_{2.5}$, todas las estaciones supera este límite como se observa en la Figura 12, destacando el sector donde se ubica el sensor UNAL, el cual registró el valor más elevado durante el período de estudio, alcanzando una concentración de $34,73 \mu g/m^3$, excediendo el límite máximo establecido por la Resolución 2254 de 2017, fijado en $25 \mu g/m^3$. Este hallazgo puede atribuirse a la ubicación del sensor en el centro de la ciudad de Villavicencio, identificado previamente como el principal centro de atracción urbana según el inventario de la Secretaría de Ambiente para el año 2022 (ver Figura 9). Esta área concentra un alto tráfico de vehículos motorizados como motocicletas, automóviles y buses/busetas/microbús, estos últimos en su mayoría alimentados por diésel. Por otro lado, hay que agregar que los cambios de concentración promedio entre los cuatro puntos de monitoreo de donde se pudo obtener datos de concentración fue de $10,89 \mu g/m^3$, asumiendo que este valor sea representativo para toda la ciudad, teniendo en cuenta la falta de instrumentos de medición (estaciones o sensores) para este contaminante.

En la Figura 13, se presentan las concentraciones de $PM_{2.5}$ obtenidas en los principales centros atractores para la población en la ciudad de Villavicencio. Estos puntos se caracterizan por su elevado tráfico vehicular, lo que se refleja en las mayores concentraciones de $PM_{2.5}$ registradas.

Figura 13. Concentraciones de $PM_{2.5}$ entre junio de 2022 y 2023

Nota. Identificación de las concentraciones anuales 2022 y 2023 de material particulado inferior a 2.5 micras dentro del área urbana de Villavicencio. Elaboración propia en el software ArcGIS

La formación de material particulado dentro de las cámaras de combustión de las fuentes móviles independientemente su combustible, se debe a la interacción de varios factores y las reacciones físicas y químicas dentro de las moléculas que sufren en menos de un segundo dando como resultado el $PM_{2.5}$, compuesto principalmente por hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAHs) y de otros compuestos orgánicos volátiles (VOCs) los cuales lo hacen más peligroso para la inhalación humana (Agudelo, 2017), y como se observa en la Figura 13 es la zona centro donde más se concentra la cantidad de estas partículas en suspensión.

6.2. Fase 2. Análisis de la información recolectada de contaminantes y enfermedades asociadas

La información proporcionada por la Secretaría de Salud de Villavicencio en su Boletín Epidemiológico para el año 2023 se resaltan los casos que se presentaron para la ciudad en relación con Infecciones Respiratorias Agudas (IRA), teniendo en cuenta el evento epidemiológico 995 de “Morbilidad de IRA”, los cuales se clasificaron por grupos etarios, tal como se observa en la Tabla 5.

Tabla 5. Casos de IRA presentados entre junio de 2022 y junio de 2023

Edades	Hospitalización	UCI	Consultas Externas	Mortalidad
<1	371	134	4058	4
1	485	41	3942	3
2 a 4	699	33	9158	0
5 a 19	672	64	15852	16
20 a 39	519	54	15910	8
40 a 59	489	95	12143	25
> 60	1078	229	9799	129
Total	4313	649	70862	185

Nota. Casos reportados de IRA por la plataforma SIVIGILA y proporcionados por la Alcaldía de Villavicencio (2023)

De los casos obtenidos de IRA para el período seleccionado se puede afirmar que el grupo etario más afectado fueron los mayores de 60 años, ya que tuvieron los registros más altos en tres de los cuatro reportes realizados, con 1078 hospitalizaciones, 229 entradas a la Unidad de Cuidados Intensivos (UCI) y 129 muertes asociadas a estas patologías.

A partir de los datos recopilados de los casos de IRA para el periodo comprendido entre los meses de junio del año 2022 y 2023, obtenidos de la Secretaría de Salud y la plataforma SIVIGILA, se calcularon las tasas de incidencia para hospitalización, UCI, consultas externas y de mortalidad de IRA. Este análisis tiene como objetivo comprender el impacto de este grupo de patologías en el sistema de salud pública y su posible influencia en los costos asociados. En la Tabla 6, se registran las tasas de incidencia por edades para la ciudad de Villavicencio.

Tabla 6. *Tasas de incidencia. Casos por cada 100.000 habitantes*

Edades	Hospitalización	UCI	Consultas Externas	Mortalidad
<1	64	23	702	1
1	84	7	682	0
2 a 4	121	6	1585	0
5 a 19	116	11	2743	3
20 a 39	90	9	2753	1
40 a 59	85	16	2101	4
> 60	187	40	1696	22

Nota. Tasas de incidencia determinadas sobre una población de 100.000 habitantes a partir de información de la Alcaldía de Villavicencio (2023).

Los resultados muestran una variabilidad significativa en la incidencia de IRA, donde el grupo etario con la mayor frecuencia de nuevos casos de IRA son los mayores de 60 años donde se presentan 40 casos nuevos de hospitalización por cada 100.000 habitantes, y a su vez, presentan la mayor tasa de mortalidad, con 4 casos por cada 100.000 habitantes. En cuanto a las consultas externas se observa que los grupos etarios de 5 a 19 años y 20 a 39 años presentan una parte significativa de nuevos casos, con 5496 casos por cada 100.000 habitantes.

Usando la compilación de estudios epidemiológicos a partir de la revisión bibliográfica realizada, se identificaron los riesgos relativos necesarios para determinar el FAP, tal como se observa en la Tabla 7, en temas de admisiones hospitalarias y mortalidad, para un cambio en las concentraciones de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de material particulado. Asumiendo que en Villavicencio este ocurriendo ese comportamiento, teniendo en cuenta las concentraciones identificadas en la Fase 1, en distintas áreas de la ciudad y los cambios de concentración entre estas zonas mensualmente (ver Anexo 3).

Tabla 7. Riesgos Relativos por un cambio de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Efecto	Edad	Contaminante	β	RR	Fuente
Mortalidad por causas respiratorias	Todas	PM ₁₀	0,007417	1,077	(Ito, 2003)
Mortalidad por causas respiratorias	Todas	PM _{2.5}	0,007696	1,080	(Ito, 2003)
Admisión hospitalaria por enfermedades respiratorias	<65	PM _{2.5}	0,003324	1,033	(Abt Associates Inc, 2010)
Admisión hospitalaria por enfermedades respiratorias	>65	PM _{2.5}	0,001734	1,0175	(Moamer et al, 2023)
Admisión hospitalaria por enfermedades respiratorias	Todas	PM ₁₀	0,001093	1,011	(Gouveia, 2003)

Nota. Compilación de valores de β y RR a partir de la revisión bibliográfica de estudios epidemiológicos. Elaboración propia a partir de lo hecho por CAI (2013)

De acuerdo con la revisión bibliográfica Ito (2003) determinó en su estudio el riesgo relativo al cual se exponen las personas por la presencia PM_{2.5} y PM₁₀ en la atmósfera, mediante el uso de un modelo de predicción de calidad del aire, con el cual pudieron determinar tanto el riesgo relativo por admisiones hospitalarias de ciertas patologías respiratorias, así como el riesgo relativo de mortalidad asociado a todas las enfermedades respiratorias. Siendo este último el que se tuvo en cuenta para los propósitos de este estudio, con valores de $\beta = 0,007417$ y $RR = 1,077$ para PM₁₀, y de $\beta = 0,007696$ y $RR = 1,080$ para PM_{2.5}.

Para las hospitalizaciones por enfermedades respiratorias, incluyendo las Infecciones Respiratorias Agudas (IRA), se tomaron en cuenta varios estudios epidemiológicos para determinar los riesgos relativos. Cada estudio se enfocó en un grupo etario en particular, en consonancia con las necesidades de la investigación realizada. Para el caso del PM₁₀, se utilizó lo hecho por Gouveia (2003), quien llevo a cabo un estudio en las ciudades de Sao Paulo y Rio de Janeiro, con el objetivo de evaluar el impacto de las emisiones de PM₁₀ en la salud pública. Se pudo determinar que los niveles de contaminación experimentados en esas ciudades influyen en el aumento de las admisiones hospitalarias por enfermedades respiratorias, arrojando como resultado $\beta = 0,001093$ y $RR = 1,011$ para todos los rangos de edad.

En cuanto a $PM_{2.5}$, se consideraron dos estudios, dado que la mayoría de los estudios epidemiológicos de este tipo se enfocan en dos rangos de edad, los menores de 65 años y los mayores de 65 años. Con respecto a los mayores de 65 años se utilizó el riesgo relativo definido por Moamer et al (2023), quienes consideraron el tráfico vehicular como un factor influyente en las concentraciones de $PM_{2.5}$ en la ciudad de Hamadan, Irán. Se estableció que el riesgo relativo promedio para este grupo de edad fue de $RR = 1,0175$, determinado a partir de $\beta = 0,001734$ para un cambio en la concentración de $10 \mu g/m^3$. Para el grupo de menores de 65 años, se empleó el estudio de (Abt Associates Inc, 2010), el cual determinó el riesgo relativo entre las admisiones hospitalarias por enfermedades respiratorias, debido a las emisiones en la ciudad de Seattle, USA, con resultados de $\beta = 0,003324$ y $RR = 1,033$.

Utilizando la Ecuación 3 para estimar la Fracción Atribuible de la Población (FAP) afectada por la presencia de $PM_{2.5}$ y PM_{10} en el aire, se calcularon los posibles casos atribuibles a dichos contaminantes para cada grupo etario, considerando los casos de Infecciones Respiratorias Agudas (IRA) proporcionados por la Secretaría de Salud. En la Tabla 8 se presentan los resultados obtenidos de esta estimación para $PM_{2.5}$ y PM_{10} .

Tabla 8. Casos atribuibles para hospitalización de IRA por $PM_{2.5}$ y PM_{10}

Edades	Hospitalización	Admisión Hospitalaria					
		PM_{10}			$PM_{2.5}$		
		RR	FAP	Casos atribuibles	RR	FAP	Casos atribuibles
<1	371	1,011	0,011	4	1,033	0,032	12
1	485	1,011	0,011	5	1,033	0,032	15
2 a 4	699	1,011	0,011	8	1,033	0,032	22
5 a 19	672	1,011	0,011	7	1,033	0,032	21
20 a 39	519	1,011	0,011	6	1,033	0,032	17
40 a 59	489	1,011	0,011	5	1,033	0,032	16
> 60	1078	1,011	0,011	12	1,0175	0,017	19
Total	4313			47			122

Nota. Estimación de los casos atribuibles de IRA por $PM_{2.5}$ y PM_{10} , teniendo en cuenta el procedimiento establecido por Ueda (2023)

De acuerdo con la Tabla 8, en la ciudad de Villavicencio para el periodo comprendido entre los meses de junio de 2022 a 2023, se observa que a medida que aumenta la edad, también lo hacen

los casos atribuibles para hospitalización, tanto para $PM_{2.5}$ como para PM_{10} , dándose de manera gradual para cada grupo etario. El riesgo relativo (RR) empleado vario de acuerdo con el contaminante, teniendo en cuenta los estudios epidemiológicos seleccionados para establecer el RR. De acuerdo, con Pope et al (2002) el $PM_{2.5}$ al ser partículas muy finas presentan un riesgo más alto en patologías asociadas con enfermedades respiratorias. En su estudio, pudieron demostrar que este contaminante aumenta el riesgo en un 4%, caso contrario a lo determinado por Romero et al (2004), donde se demostró que el PM_{10} aumenta solo en un 1,5% el riesgo de afectación por exposición a este contaminante. Estas afirmaciones se resaltan para entender por qué el RR para $PM_{2.5}$ es mayor que el determinado para PM_{10} .

Teniendo en cuenta lo anterior, el FAP calculado para cada contaminante muestran dicho comportamiento, ya que en este caso el FAP para el $PM_{2.5}$ fue mayor con un valor de 0,032, en comparación con el 0,011 obtenido para el PM_{10} . Esto hizo que los casos atribuibles por $PM_{2.5}$ fueran casi tres veces más en comparación con los de PM_{10} .

Determinado el FAP se obtuvieron en total 47 casos atribuibles de admisiones hospitalarias para el PM_{10} y 122 para el $PM_{2.5}$, siendo este último el contaminante que más influyó en la propagación de casos por Infecciones Respiratorias (IRA) en los meses de junio de los años 2022 y 2023. A partir de esta información se calcularon las tasas de incidencia de hospitalización por la presencia de $PM_{2.5}$ y PM_{10} en el aire, tal como se observa en la Tabla 9.

Tabla 9. Tasa de incidencia de hospitalización de IRA por material particulado

Edades	Hospitalización	Tasa de incidencia
<1	16	3
1	21	4
2 a 4	30	5
5 a 19	29	5
20 a 39	22	4
40 a 59	21	4
> 60	30	5
	169	29

Nota. Cálculo de las tasas de incidencia de hospitalización por IRA para cada grupo etario por a la presencia de $PM_{2.5}$ y PM_{10} en el aire. Elaboración propia a partir de la ecuación establecida por Alcaldía de Villavicencio (2023).

En la Tabla 9 se presentan las tasas de incidencia calculadas para los casos atribuibles estimados tanto para $PM_{2.5}$ como para PM_{10} . Para llevar a cabo este cálculo, se sumaron los casos estimados para cada contaminante, con el propósito de determinar una tasa única que pueda servir como punto de referencia en futuras investigaciones relacionadas con la contaminación atmosférica por material particulado. Como resultado, se identificó que los grupos de edad con la mayor cantidad de nuevos casos de hospitalización por IRA por cada 100.000 habitantes en Villavicencio son aquellos de 2 a 4 años, de 5 a 19 años y los mayores de 60 años, con 5 nuevos casos por cada 100.000 habitantes.

Conociendo los casos atribuibles por hospitalización para IRA en la ciudad de Villavicencio, se estimaron los casos de mortalidad por este grupo de enfermedades respiratorias a partir de los riesgos relativos identificados. En la Tabla 10 se pueden observar los resultados obtenidos a lo mencionado anteriormente.

Tabla 10. Casos atribuibles de mortalidad por IRA asociado con $PM_{2.5}$ y PM_{10}

Edades	Mortalidad	Mortalidad por IRA					
		PM_{10}			$PM_{2.5}$		
		RR	FAP	Casos atribuibles	RR	FAP	Casos atribuibles
<1	4	1,077	0,071	0	1,08	0,074	0
1	3	1,077	0,071	0	1,08	0,074	0
2 a 4	0	1,077	0,071	0	1,08	0,074	0
5 a 19	16	1,077	0,071	1	1,08	0,074	1
20 a 39	8	1,077	0,071	1	1,08	0,074	1
40 a 59	25	1,077	0,071	2	1,08	0,074	2
> 60	129	1,077	0,071	9	1,08	0,074	10
Total	185			13			14

Nota. Estimación de los casos atribuibles de mortalidad por IRA asociado a $PM_{2.5}$ y PM_{10} , teniendo en cuenta el procedimiento establecido por Ueda (2023)

Teniendo en cuenta lo observado en la Tabla 10, se puede resaltar que en general se presentan pocos casos atribuibles de mortalidad de IRA por la presencia de $PM_{2.5}$ y PM_{10} en el aire. De los siete grupos de edad analizados, tres de ellos no se les estimaron ningún caso atribuible, los cuales fueron de edades menores 1 año hasta edades de 5 años. Por otro lado, el grupo con la

mayor cantidad de casos atribuibles fueron los mayores de 60 años con 9 muertes atribuibles a PM_{10} y 10 muertes asociadas por $PM_{2.5}$. Frente a esto, se calcularon las tasas de incidencia de mortalidad de IRA por la contaminación de $PM_{2.5}$ y PM_{10} . En la Tabla 11, se observan los resultados obtenidos de estos cálculos para el material particulado.

Tabla 11. Tasa de incidencia de mortalidad de IRA por material particulado

Edades	Mortalidad	Tasa de incidencia
<1	0	0
1	0	0
2 a 4	0	0
5 a 19	2	0
20 a 39	2	0
40 a 59	4	1
> 60	19	3
	27	5

Nota. Cálculo de las tasas de incidencia de mortalidad por IRA para cada grupo etario por a la presencia de $PM_{2.5}$ y PM_{10} en el aire. Elaboración propia a partir de la ecuación establecida por Alcaldía de Villavicencio (2023).

En referencia a los datos presentados en la Tabla 11, se destaca la baja incidencia de nuevos casos de mortalidad por IRA atribuible a la contaminación por material particulado. En cinco de los siete grupos de edad analizados, no se registraron muertes atribuibles. En los dos grupos restantes, comprendidos entre las edades de 40 a 59 años y mayores de 60 años, se observaron decesos, siendo este último grupo el que mostró la tasa más elevada con 3 muertes por cada 100.000 habitantes en Villavicencio.

Para el conjunto de casos atribuibles, la tasa de mortalidad por IRA asociada a la contaminación atmosférica en Villavicencio, durante el período comprendido entre junio de 2022 y 2023, fue de 5 muertes por cada 100.000 habitantes, siendo esta una tasa baja en comparación con la establecida por Tolosa (2019).

La determinación de los costos se realizó teniendo en cuenta lo hecho por Bernal et al (2017), el cual en su estudio estimó los costos de atención de IRA en un centro de Salud de Aquitania en Boyacá. De la información recopilada se tuvo en cuenta los costos de imágenes

diagnósticas, pruebas de laboratorio, medicamentos, consultas, estancia hospitalaria, materiales e insumos y traslados. En la Tabla 12, se puede observar el ajuste de precios realizado al año 2022.

Tabla 12. *Estimación de costos por hospitalización para el año 2022*

Rubro de atención	Promedio 2022	I.C. 95%	
Consultas	\$ 61.560	\$ 60.916	\$ 62.203
Laboratorios	\$ 50.181	\$ 42.429	\$ 57.934
Imágenes diagnósticas	\$ 48.866	\$ 39.913	\$ 57.820
Medicamentos	\$ 173.793	\$ 138.434	\$ 209.152
Materiales e insumos	\$ 37.095	\$ 31.827	\$ 42.362
Traslados	\$ 49.560	\$ 23.718	\$ 75.403
Estancia	\$ 739.444	\$ 639.424	\$ 839.465
Costo Directo Médico	\$ 1.160.499	\$ 976.662	\$ 1.344.339

Nota. Costos de hospitalización determinados a partir de lo hecho por Bernal et al (2017), teniendo en cuenta la inflación establecida por el DANE hasta el año 2022

Teniendo en cuenta que los precios que manejo Bernal et al (2017) eran del año 2014, para el caso de este estudio, se ajustaron para el año 2022. Para ello, se empleó la inflación de Índice de Precio del Consumidor (IPC) anual hasta el año 2022, dando como resultado un costo total de hospitalización de \$1.160.499 (IC95% \$976.662-\$1.344.339) para una persona que presenta IRA. Bernal et al (2017) afirma que la metodología *bottom-up* empleada en su estudio para determinar los costos de hospitalización por IRA es la mejor para determinar los costos de servicios hospitalarios, debido al nivel de detalle y precisión de los componentes relevantes de los costos.

6.3. Fase 3. Valoración económica ambiental del impacto a la salud pública

Con los casos atribuibles estimados, se determinaron los costos totales por hospitalización, los cuales se pueden observar en la Tabla 13.

Tabla 13. *Costos totales de hospitalización atribuibles*

Edades	Costo por Hospitalización	Días Hospitalización	PM10		PM2.5		Costos Totales
			Casos IRA	Costos por IRA	Casos IRA	Costos por IRA	
<1	\$ 1.160.499	8	4	\$ 37.433.551	12	\$ 109.908.964	\$ 147.342.514
1	\$ 1.160.499	8	5	\$ 49.006.519	15	\$ 143.888.452	\$ 192.894.971
2 a 4	\$ 1.160.499	8	8	\$ 70.580.817	22	\$ 207.232.931	\$ 277.813.748
5 a 19	\$ 1.160.499	8	7	\$ 67.866.170	21	\$ 199.262.434	\$ 267.128.604
20 a 39	\$ 1.160.499	8	6	\$ 52.435.546	17	\$ 153.956.449	\$ 206.391.995
40 a 59	\$ 1.160.499	8	5	\$ 49.435.147	16	\$ 145.146.952	\$ 194.582.099
> 60	\$ 1.160.499	8	12	\$ 108.871.625	19	\$ 172.098.389	\$ 280.970.013
Total			47	\$ 435.629.374	122	\$ 1.131.494.570	\$ 1.567.123.945

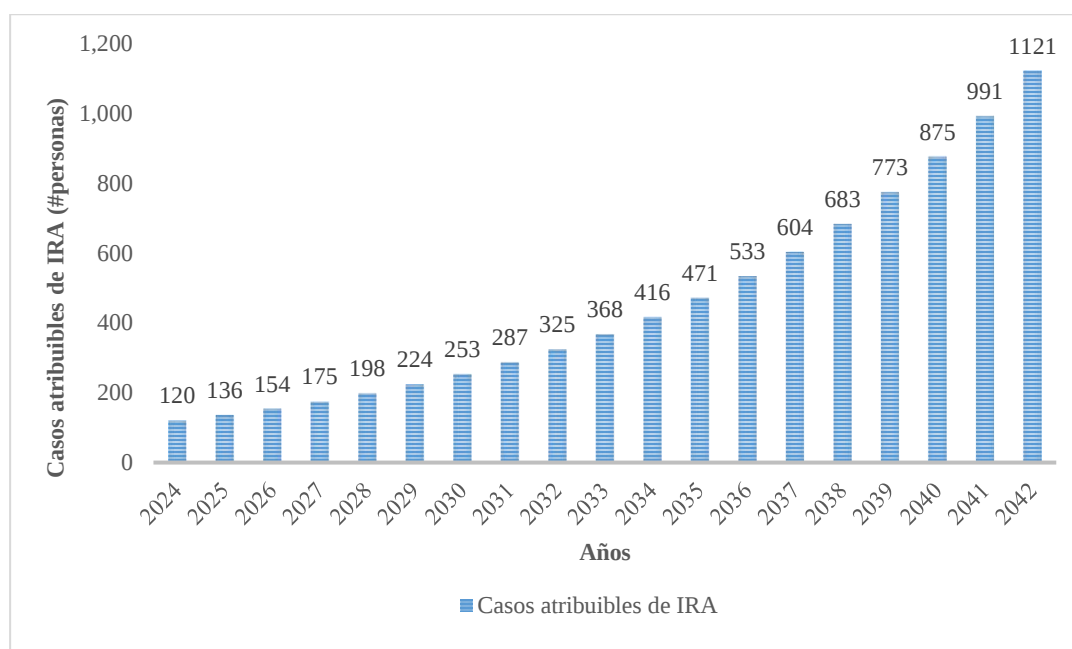
Nota. Costos estimados para los casos atribuibles por PM_{2.5} y PM₁₀ entre junio de 2022 y 2023. Elaboración propia a partir del análisis realizado de la FAP.

En la Tabla 13 se detallan los costos estimados de los casos atribuibles de IRA que requirieron hospitalización debido a la exposición a PM_{2.5} y PM₁₀ durante el período comprendido entre junio de 2022 y 2023, con una duración media de hospitalización de 8 días (Silva, 2019). Los costos totales para todos los casos atribuibles se estimaron en \$1.567.123.945 COP. Destaca que los casos estimados para PM₁₀ muestran costos 72.20% más bajos en comparación con los atribuibles a PM_{2.5}, evidenciando un menor riesgo asociado a PM₁₀.

En cuanto a los grupos etarios analizados, se observaron costos significativos de hospitalización tanto para PM_{2.5} como PM₁₀ en los grupos de 2 a 9 años y de 5 a 19 años con un total de \$544.942.352 COP, según la estimación realizada. Este fenómeno se relaciona con la mayor susceptibilidad de los adolescentes menores de 19 años a los efectos de los contaminantes atmosféricos, debido a que pasan más tiempo al aire libre, como señalan Ortega et al (2020).

6.3.1. Análisis complementario de la valoración económica

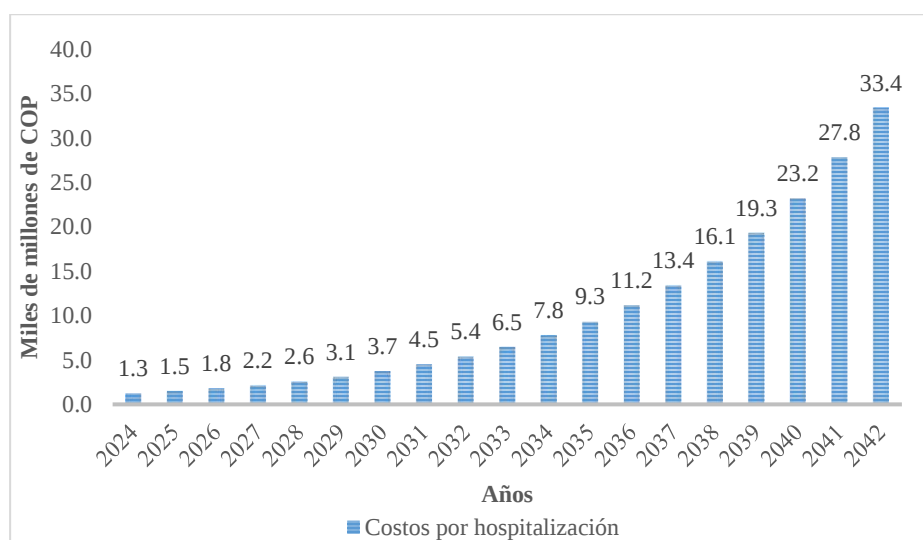
En la Figura 14, se muestran los resultados obtenidos de las proyecciones realizadas en el software MATLAB partir del código de programación diseñado, para estimar los casos atribuibles de IRA para PM_{2.5} y PM₁₀ en un periodo de 19 años comprendido entre 2024 y 2042.

Figura 14. Aumento de casos atribuibles de IRA entre el 2024 al 2042

Nota. Estimación de casos atribuible de IRA por $PM_{2.5}$ y PM_{10} entre los años 2024-2042. Elaboración propia por medio del software MATLAB

Para determinar la tasa de crecimiento de los casos atribuibles de IRA debido a la presencia de $PM_{2.5}$ y PM_{10} en el aire, se analizó el incremento anual de casos de hospitalización en la ciudad de Villavicencio durante el periodo comprendido entre 2016 y 2020. En 2016, se registraron 1213 casos de hospitalización, observándose un aumento del 11,21% para el año 2017. Posteriormente, en 2018, se experimentó una disminución del 0,81% en el número de casos, seguida de una reducción del 36,77% en 2019 finalizando con un aumento del 79,19% para el 2020. Esto resultó en una tasa de crecimiento promedio de 13,2% (ver Anexo 4), utilizada para proyectar el número de casos atribuibles, bajo el supuesto de que la tendencia se mantenga hasta el año 2042.

Con una tasa de crecimiento del 13,2% en el número de nuevos casos atribuibles al $PM_{2.5}$ y PM_{10} , se estima un aumento de 203 casos para el año 2032 y de 999 casos para el 2042 en comparación con los 122 casos que se estimaron entre los meses de junio de 2022 a 2023. Esta estimación se basa en un cambio de concentración estimado de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la concentración anual de $PM_{2.5}$ y PM_{10} para la ciudad de Villavicencio, teniendo en cuenta la metodología utilizada. A partir de los casos atribuibles estimados, se calcularon los costos asociados a dicho aumento, en la Figura 15 se puede observar los costos obtenidos.

Figura 15. Costos estimados de hospitalización por IRA entre 2024 y 2042

Nota. Estimación de los costos asociados a los casos atribuibles de IRA por $PM_{2.5}$ y PM_{10} entre los años 2024 -2042. Elaboración propia por medio del software MATLAB

En la Figura 15, se presentan los costos obtenidos para cada año desde el 2024 hasta el 2042 de los costos por hospitalización asociados a los casos atribuibles IRA por $PM_{2.5}$ y PM_{10} . Para calcular el aumento de los costos, se empleó el promedio anual de inflación en Colombia desde 2014 hasta 2023, que fue del 6% (ver Anexo 5), suponiendo que la tendencia se mantenga hasta el año 2042. Según este cálculo, se proyectan costos de \$5.398.100.000 COP para 2032 y \$33.402.000.000 COP para 2042 lo que representa un incremento del 244.46% y del 2031,42% respectivamente, en comparación con el valor obtenido entre junio de 2022 y 2023, que fue de \$1.567.123.945 COP.

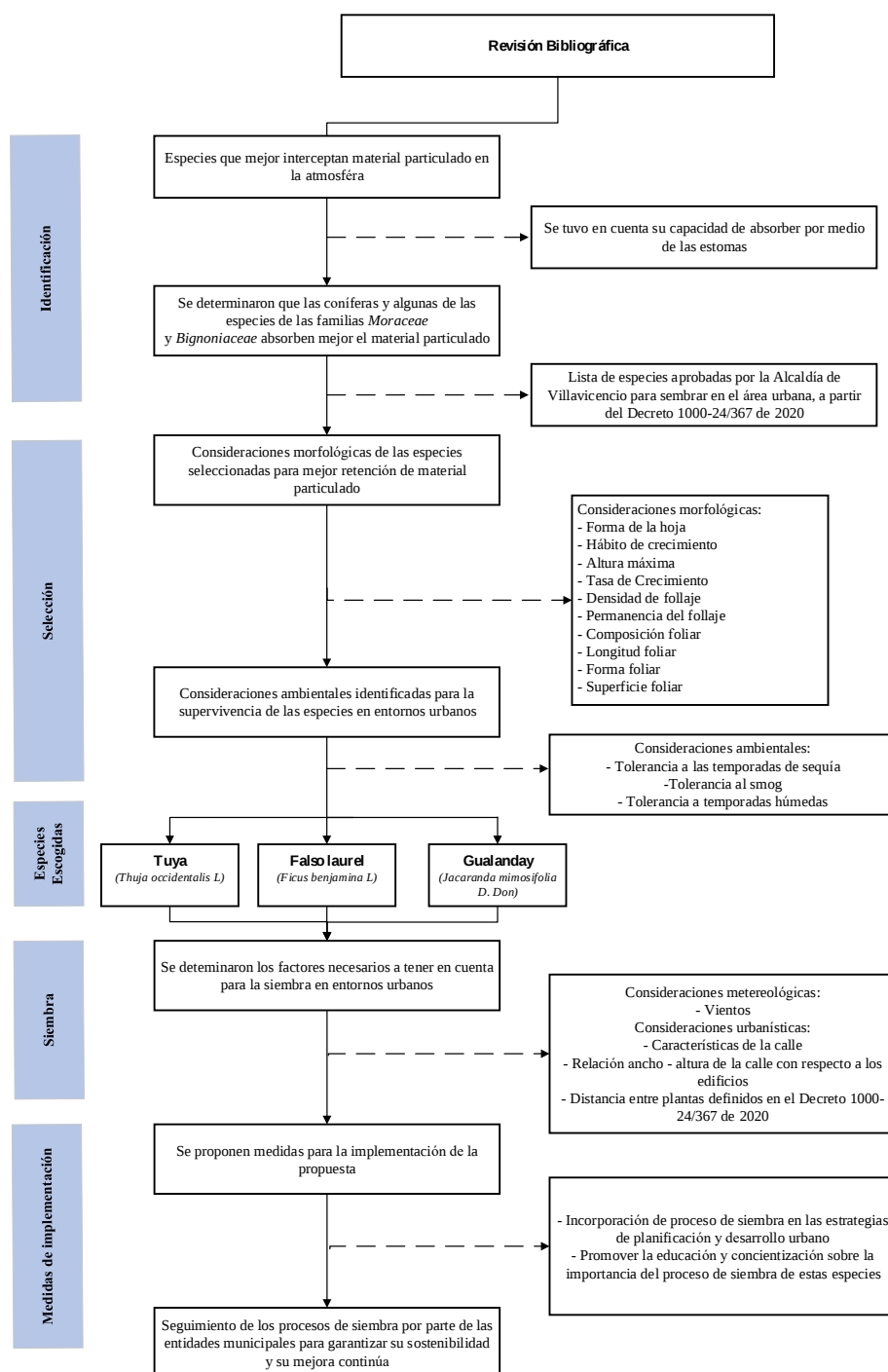
Esta proyección es relevante, dado que sugiere un aumento significativo en los gastos del sistema de salud pública para cubrir la atención de los casos estimados de IRA atribuibles por la presencia de $PM_{2.5}$ y PM_{10} en el aire, especialmente considerando la tendencia actual de las emisiones de estas partículas, parcialmente asociadas al crecimiento del tráfico vehicular en la ciudad de Villavicencio, el cual aumentaría a una tasa del 18,3% anualmente, según Alcaldía de Villavicencio (2022).

6.3.2. *Propuesta para la reducción de material particulado en el aire*

Frente a los riesgos para la salud humana provocados por las finas partículas atmosféricas han aumentado la conciencia académica y política sobre el papel de los árboles urbanos como biofiltros de la contaminación del aire (Zhang et al, 2022a). De acuerdo con Hilde & Paterson (2014), las coberturas vegetales en áreas urbanas tienen la capacidad de mejorar las condiciones ambientales de una ciudad, gracias a los beneficios derivados de la vegetación urbana, como la captura de carbono, la mitigación del ruido y la purificación el aire. Estos servicios son relevantes debido a las actividades urbanas negativas, como el uso de vehículos motorizados en vías públicas.

La contaminación del aire en áreas urbanas, especialmente por el material particulado (PM) ha ido en aumento en la ciudad de Villavicencio, como se evidenció anteriormente, y representa un riesgo para la salud humana. Los árboles y arbustos urbanos desempeñan un papel crucial al actuar como filtros naturales que ayuda a mitigar esta contaminación atmosférica. Sin embargo, la biodiversidad de la vegetación urbana implica que diferentes especies de plantas tengan capacidades variables para acumular material particulado (Moura et al, 2024).

Según Han et al (2020), la revisión bibliográfica revela que, a nivel individual, las hojas de los árboles tienen la capacidad de capturar el material particulado presente en la atmósfera mediante dos mecanismos principales: la interceptación de partículas en la superficie de las hojas y la absorción de contaminantes a través de las estomas. Por consiguiente, se ha iniciado un proyecto para desarrollar un diseño adecuado que involucra la instalación de coberturas vegetales cerca de las principales vías urbanas de Villavicencio, con el fin de controlar y reducir los niveles de material particulado tanto de $PM_{2.5}$ y PM_{10} . En la Figura 16 se presenta el esquema de los resultados obtenidos de la revisión sistemática para el desarrollo de la propuesta.

Figura 16. Resultados obtenidos de la revisión sistemática

Nota. Desarrollo de los resultados obtenidos a partir de la revisión sistemática de la propuesta con coberturas vegetales para la retención de material particulado en la ciudad de Villavicencio

Entre las especies analizadas, se destaca la especie *Perenne L nobilis* por su notable capacidad de retención y depuración de material particulado, como señalaron Moura et al (2024). Este estudio indica que esta especie es idónea para combatir la contaminación del aire, considerando los niveles de $PM_{2.5}$ y PM_{10} registrados en el aire después de su exposición. Asimismo, Zhang et al (2022a) sugieren que *Abies holophylla* podría ser una opción adecuada para mitigar la contaminación por material particulado en entornos urbanos. Por otro lado, se observó que especies como *Buddleja davidii*, *Viburnum lantana* y *Sorbus intermedia* presentaron una alta eficacia en la captura de material particulado en sus superficies foliares, mientras que especies como *Populus alba*, *Robinia pseudoacacia* y *Abies fraseri* mostraron una menor eficacia, según lo reportado por Muhammad et al (2020).

A nivel global, diversos estudios coinciden que las coníferas son las especies que mejor retienen el material particulado, en comparación con hojas de mayor tamaño y lisas. Este tipo de follaje tiende a acumular tanto partículas de $PM_{2.5}$ y PM_{10} a lo largo del gradiente rural-periurbano-urbano, como sostienen Steinparzer et al (2023), Pace and Rüdiger (2020) y Chen et al (2017). Es importante remarcar que las especies tolerantes a la sombra demostraron una mayor captura de partículas gruesas ($PM_{2.5}$ y PM_{10}) en comparación con aquellas que requieren mayor exposición a la luz solar (Zhao et al, 2023).

Procesos en la captación, incluida la deposición en las superficies de la vegetación, la encapsulación dentro de la cutícula cerosa, la resuspensión impulsada por el viento y el lavado, son factores importantes por considerar a la hora de seleccionar especies para la remoción de material particulado (Gustafsson et al, 2024).

Considerando lo expuesto anteriormente, y basándose en los criterios de selección establecidos en la literatura consultada, se han elegido tres especies arbóreas autorizadas para la plantación de áreas urbanas de la ciudad de Villavicencio, según lo estipulado en el Decreto 1000-24/367 de 2020. En la Tabla 14 se detalla la información relevante de cada especie, resaltando sus características morfológicas primordiales para la retención de material particulado, conforme a la revisión bibliográfica llevada a cabo.

Tabla 14. *Especies arbóreas seleccionadas para la propuesta*

Nombre científico	<i>Thuja occidentalis L</i>	<i>Ficus benjamina L</i>	<i>Jacaranda mimosifolia D. Don</i>
Familia	Cupressaceae	Moraceae	Bignoniaceae
Nombre común	Tuya	Falso laurel	Gualanday
Origen	Montañas Rocosas de Estados Unidos	Sur y Sureste de Asia	América del Sur
Follaje	Prennifolio	Prennifolio	Semicaducifolia
Copa	Columna o cómica; hasta 2 m	Ancha y frondosa entre 2-14 m	Ovoide con una amplitud entre 2-12m
Tipo de hoja	Escamiforme	Ovalada	Pari-bipinnadas
Altura máxima (m)	20-25m, hasta 30 m	10-20 m	10-15 m
Tolerancia ambiental	Buena a sequías. Tolerante al smog	Buena a sequías. Tolerante al smog	Buena a sequías. Tolerante al smog
Crecimiento	Moderado-rápido	Moderado-rápido	Moderado-rápido
Fuente	(Martínez Hernández, 2017)	(Jeong et al, 2020)	(Yang et al, 2015)

Nota. Descripción morfológica de las especies seleccionadas, teniendo en cuenta su capacidad para retener material particulado. Elaboración propia a partir de lo realizado por Martínez (2017).

De acuerdo con la Tabla 14, se pudo identificar a partir del Decreto 1000-24/367 de 2020 que la única especie autorizada para la siembra del grupo de las coníferas es la *Thuja occidentalis L*. Esta especie se distingue por su crecimiento moderado a rápido, lo cual la hace ideal para la incorporación en procesos de reforestación urbana. Para propósitos de este estudio, este crecimiento rápido facilita la ejecución del proyecto destinado a la retención de material particulado. Este mismo patrón de crecimiento se observó en las especies *Ficus benjamina L* y *Jacaranda mimosifolia D. Don*. Estas tres especies destacan por su capacidad para tolerar condiciones ambientales adversas, como períodos de sequía y la presencia de smog en el aire. Esta resistencia las convierte en eficaces retenedoras de material particulado, que pueden retener hasta que, mediante eventos de precipitación, las partículas sean depositadas en el suelo.

Según Joshi et al (2020) la especie *Ficus benjamina L* se caracteriza por tener un follaje de tipo Prennifolio de textura suave que le permite retener mejor el material particulado con hojas ovaladas de gran tamaño y de punta aguda, las cuales pueden llegar a tener un tamaño entre 1,5 cm a 10 cm de largo y de 1 a 5 cm de ancho (Alvarado & Munzón, 2020).

Tabla 15. Clasificación de las especies según su capacidad de remoción de PM

Nombre científico	Nombre común	Familia	Hábito de crecimiento	Altura máxima	Tasa de crecimiento	Densidad del follaje	Permanencia del follaje	Composición foliar	Longitud foliar	Forma foliar	Superficie foliar	Suma
<i>Thuja occidentalis</i> L.	Tuya	Cupressaceae	3	3	3	3	3	1	3	3	3	25
<i>Ficus benjamina</i> L.	Falso laurel	Moraceae	3	2	3	3	3	1	3	1	2	21
<i>Jacaranda mimosifolia</i> D. Don	Gualanday	Bignoniaceae	3	2	3	2	2	3	1	1	2	19

Nota. Análisis cuantitativo de las principales características morfológicas de las especies seleccionadas para la propuesta. Elaboración propia a partir de lo realizado por Vásquez & Arroyave (2019)

La calificación cuantitativa obtenida para las tres especies arbóreas, según la clasificación establecida por Yang et al (2015) (ver Anexo 6), muestra que la especie *Thuja occidentalis* L perteneciente al grupo de las coníferas, obtuvo la calificación más alta, con un valor total de 25, de acuerdo con los criterios establecidos y afín a la investigación. Este resultado respalda la literatura revisada, que indica que las coníferas tienen una mayor capacidad para retener material particulado, debido a sus características morfológicas, tales como su superficie foliar, la cual, al ser membranosa, permite que haya una mayor retención del material particulado. Sin embargo, las otras dos especies (*Ficus benjamina* L y *Jacaranda mimosifolia* D. Don) también obtuvieron calificaciones elevadas, lo que las convierten en alternativas viables para la retención de material particulado en el proceso de siembra en entornos urbanos.

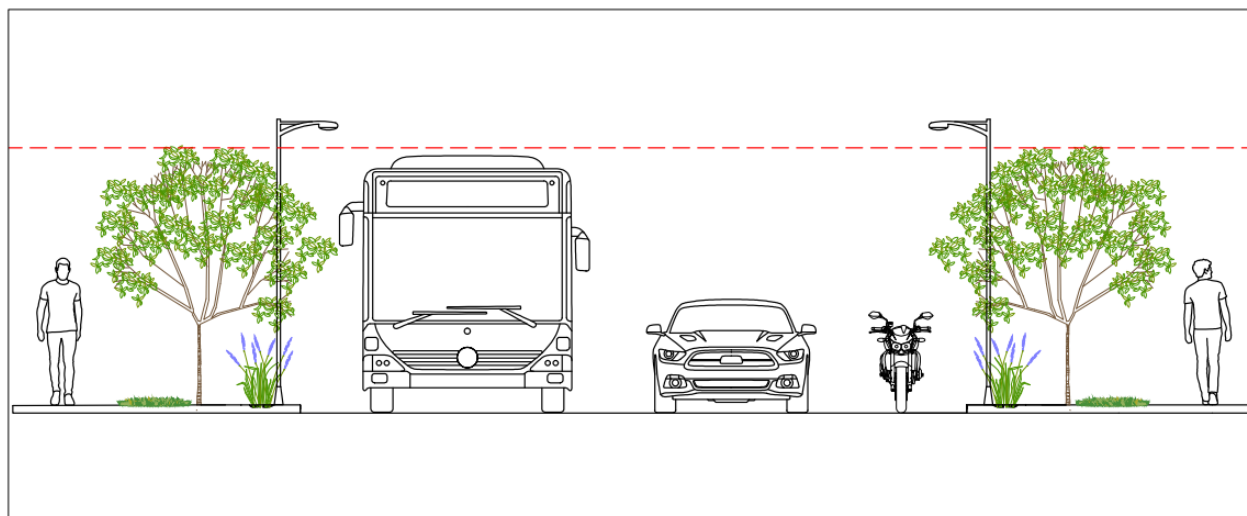
La función de las hojas de estas tres especies seleccionadas es primordial en los estudios de retención de material particulado (PM), pero también lo son las ramas y los troncos, ya que pueden retener y depurar dichos contaminantes. Un estudio realizado por Zhang et al (2022b) encontraron que la rugosidad de la superficie incrementa la capacidad de las ramas para retener PM, dado que una superficie más rugosa aumenta significativamente la turbulencia, lo que facilita la difusión de

partículas con el viento. Al igual que lo que plantean Wang et al (2024) destacando la notable capacidad de la corteza de los árboles para eliminar material particulado, soportando de este modo también la selección de las tres especies propuestas.

Investigaciones recientes, como las de Gaglio et al (2022) y Kwak et al (2023), destacan la importancia de ciertos índices para la retención de material particulado. Estos índices se relacionan con características morfológicas y funcionales de las hojas, como el almacenamiento de agua en las hojas, la velocidad de deposición, la tasa de resuspensión y la capacidad de lavado de las hojas para las especies arbóreas utilizadas. Investigaciones adicionales como las de Tomson et al (2024), respaldan estos hallazgos al indicar que rasgos micro morfológicos de las hojas, como la rugosidad superficial, la densidad de pelos y la densidad estomática, varían entre especies y superficies foliares, lo que influye en la capacidad de retención de partículas, índices que se tuvieron en cuenta para la selección de las tres especies propuestas.

Adicional a esto, Barwise et al (2024) señalaron que el área superficial de follaje por longitud de rama (FSA por sus siglas en inglés) fue el rasgo más influyente, mostrando una relación inversa con la eficacia de lavado. Esto sugiere que la FSA podría ser un factor determinante en la elección de especies para mejorar la calidad del aire en entornos urbanos, por este motivo la especie *Jacaranda mimosifolia* D. Don a pesar de tener la sumatoria más baja fue también seleccionada para la propuesta.

Para lograr una adecuada siembra y control de especies, es esencial considerar diversos factores que influyen en el entorno urbano, como señalan Shaneyfelt et al (2017). Estos incluyen las características de la calle, la relación ancho-altura de la calle con respecto a los edificios, el tipo y la ubicación de los árboles, así como los vientos predominantes en la ciudad, los cuales puedan impactar las concentraciones de contaminantes tanto dentro de la calle como a lo largo de las aceras, es por este motivo que se busca con la propuesta ubicar las especies mencionadas de tal manera que puedan mitigar la presencia de material particulado en la ciudad de Villavicencio. En la Figura 17, se muestra el diseño propuesto para este proyecto.

Figura 17. *Diseño de coberturas vegetales para la reducción de material particulado*

Nota. Distribución más eficiente para la disminución de material particulado en vías transitadas. Elaboración propia a partir de lo establecido por Cardona & Bermúdez (2019).

Según Cardona & Bermúdez (2019) para maximizar la capacidad de retención de material particulado por parte de las especies arbóreas, es crucial que no superen la altura de los vehículos motorizados. Esto garantizará que las hojas de las plantas puedan retener eficazmente el material particulado emitido por las fuentes móviles. El diseño presentado en la Figura 17, tiene como objetivo plantar especies arbóreas en las zonas más críticas de emisión, que de acuerdo con este estudio fueron la zona del centro de la ciudad de Villavicencio, así como en la salida a Bogotá D.C y Vía Puerto López, en donde se asegure que estas no superen la altura máxima promedio de los vehículos que transitan por esas vías.

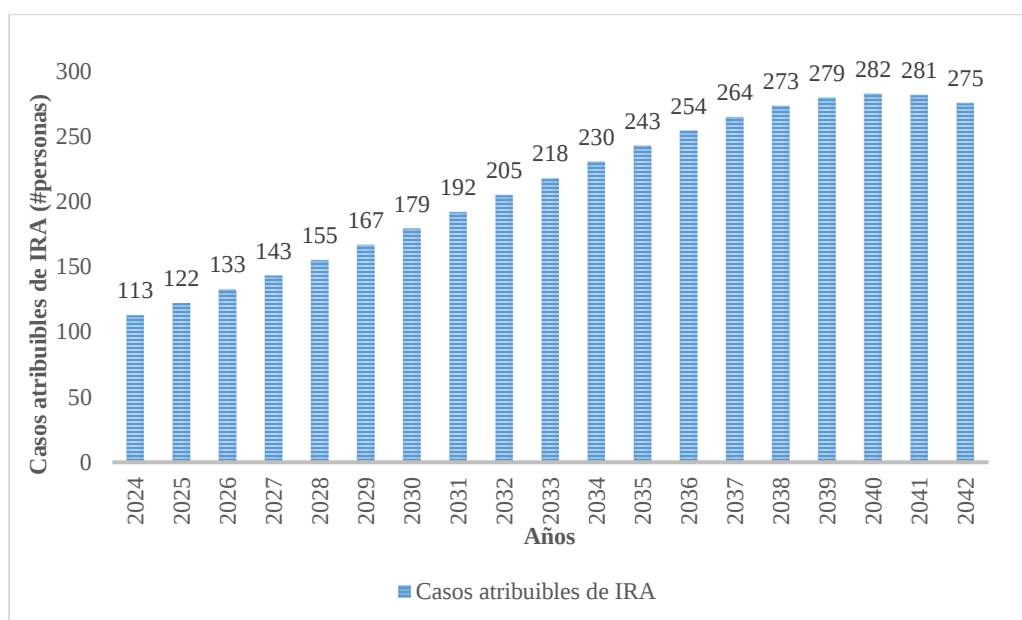
Al mantener la altura de las especies arbóreas por debajo de la de los vehículos, se facilitará el paso de las corrientes de aire, permitiendo que transporten las emisiones restantes a la atmósfera. Según Lindén et al (2023) las coberturas vegetales pueden actuar como barreras que obstaculizan el flujo de aire, atrapando contaminantes que podrían ser inhalados por las personas que transitan estas vías. Por esta razón, la Figura 17 establece el límite al que deben llegar estas especies, las cuales pueden mejorar su capacidad de retención mediante la inclusión de arbustos y ciertas especies de pasto para fortalecer esta barrera natural.

Para un maximizar el impacto de esta propuesta, se sugiere realizar un análisis de cinco métricas directas principales según lo indicado por Vigevani et al (2024). Estos autores proponen que la retención de material particulado en las hojas puede ser medida mediante métodos como el

gravimétrico, el monitor de aerosoles, túneles de viento y cámaras de deposición, así como mediante técnicas de Microscopía Electrónica de Barrido o el de Magnetización Isotermal Remanente Saturación. Posteriormente, estos métodos de medición pueden ser sometidos a evaluación en modelos específicos, como el modelo VIDA (Vegetation Impact Dynamic Assessment), utilizado por Gustafsson et al (2024) para cuantificar la eliminación de contaminantes del aire a través de la deposición en la vegetación. Asimismo, se puede considerar el enfoque utilizado por (Fares et al, 2020), quienes utilizaron el modelo de dosel multicapa AIRTREE para predecir la cantidad de CO_2 , O_3 y PM eliminados por especies de árboles urbanos.

La revisión sistemática de la información indica que la implementación de esta propuesta en la ciudad de Villavicencio podría conducir a resultados favorables, como se observó en los estudios de Cao et al (2022) y Zhiguo et al (2022), con disminución del material particulado significativamente, estos hallazgos sugieren que los árboles tienen la capacidad de eliminar eficazmente partículas finas del aire, lo que podría reducir la exposición humana a la PM inhalable, se estima que Villavicencio al ser una ciudad en el trópico y con similitudes al estudio de Tran et al (2022) puede llegar a una reducción que supere el 60% de partículas finas en suspensión acumulativamente año a año. Es importante destacar que los niveles promedio de PM en el aire y su acumulación en las hojas fueron más altos durante la temporada húmeda que en la temporada seca, según Moura et al (2024), esto se debe a que la deposición húmeda en el suelo después del lavado de las hojas durante la temporada húmeda limita la reincorporación del PM al ambiente durante las temporadas secas.

6.3.2.1. Estimación reducción de casos atribuibles con la propuesta. En la Figura 18 se observan los resultados obtenidos de las estimaciones realizadas al año 2042 con la propuesta diseñada en este estudio de los casos atribuibles de IRA por material particulado en la ciudad de Villavicencio, a partir del modelo realizado en el software MATLAB.

Figura 18. Casos atribuibles de IRA entre el 2024 al 2042 con la propuesta

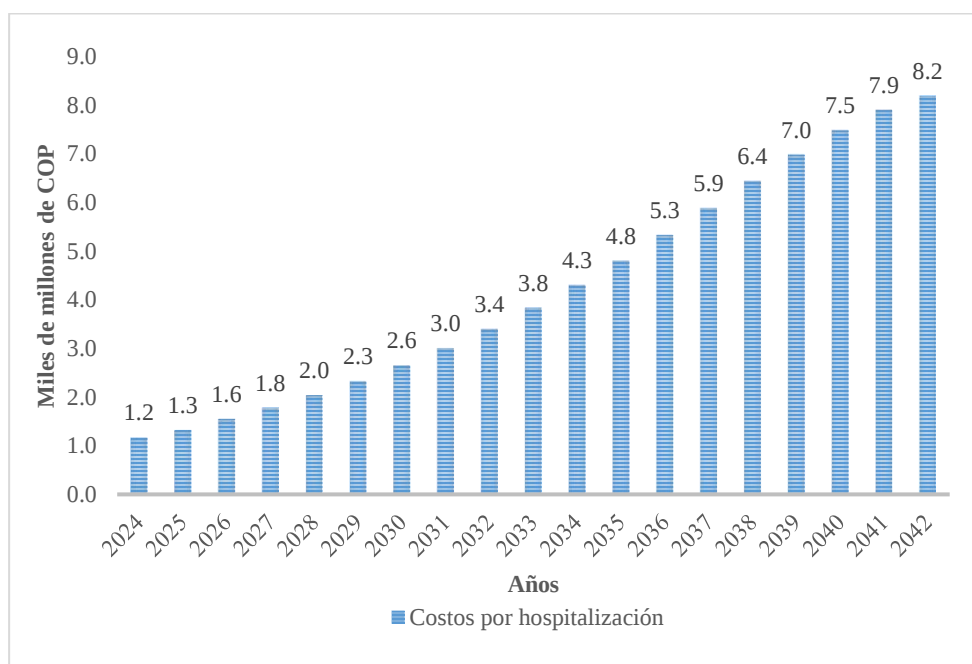
Nota. Estimación de casos atribuible de IRA por $PM_{2.5}$ y PM_{10} entre los años 2024-2042 teniendo en cuenta la reducción estimada de las especies arbóreas seleccionadas para este estudio. Elaboración propia por medio del software MATLAB.

Para determinar los casos atribuibles de IRA por la presencia de $PM_{2.5}$ y PM_{10} en el aire, debido a la reducción en el cambio de la concentración en la Ecuación 2 del riesgo relativo, se estableció una reducción gradual del 3,8% en las concentraciones por la presencia de especies arbóreas en la ciudad, buscando que los casos atribuibles se pudieran estabilizar en el tiempo. De acuerdo con la simulación realizada, para el año 2040 se alcanzaría el punto máximo de casos atribuibles con un total de 282, esto bajo el supuesto de que los cambios anuales en las concentraciones de $PM_{2.5}$ y PM_{10} se reduzcan de $10 \mu g/m^3$ a $3,2 \mu g/m^3$, es decir, una reducción del 68% en las concentraciones. Según Castro & Garzón (2022), para lograr una reducción aproximada del 60% del material particulado, la cobertura vegetal debe ocupar al menos un 40% del área urbana total. Considerando el último inventario del arbolado urbano en Villavicencio, realizado por Méndez (2014), donde se estimaron 550.000 árboles, se propone sembrar al menos el 40% de ese total, es decir, 220.000 individuos, para alcanzar dicha reducción.

Con una reducción del 68% en el cambio de las concentraciones de material particulado se espera que los casos atribuibles se reduzcan en un 67,8%, pasando de 875 casos en el año 2040, tal como se observa en la Figura 14 a 281 casos para el mismo año (ver Figura 18). Para que se

mantenga esta tendencia en el tiempo, se debe asegurar que los cambios en las concentraciones de material particulado en la ciudad de Villavicencio no superen los $3,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ anualmente. A partir de los casos atribuibles estimados, se calcularon los costos asociados a dicha reducción, en la Figura 19 se puede observar los costos obtenidos.

Figura 19. Costos estimados de hospitalización por IRA con la propuesta



Nota. Estimación de casos atribuible de IRA por $\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10} entre los años 2024-2042 teniendo en cuenta la reducción estimada de las especies arbóreas seleccionadas para este estudio. Elaboración propia por medio del software MATLAB.

En la Figura 19, se presentan los costos obtenidos para cada año desde el 2024 hasta el 2042 de los costos por hospitalización asociados a los casos atribuibles IRA por $\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10} , después de aplicar la reducción de cambios en la concentración. Según este cálculo, se proyecta una reducción del 75,4% en los costos pasando de \$33.402.000.000 COP para 2042 (ver Figura 15) a \$8.187.000.000 COP con la reducción aplicada. Los costos tuvieron un comportamiento diferente a los casos atribuibles teniendo en cuenta que anualmente se les iba aplicando el incremento de la inflación del 6%.

7. Impacto social y humanístico del proyecto

La valoración económica ambiental de los costos asociados al tratamiento de Infecciones Respiratorias Agudas (IRA) provocadas por emisiones de material particulado se convierte en un insumo esencial para el desarrollo de políticas destinadas a proteger y mejorar la calidad del aire. El empleo de métodos sencillos para determinar estos costos facilita la comprensión del impacto del aumento de emisiones provenientes de fuentes móviles en una ciudad.

Esta herramienta podría integrarse dentro del plan decenal de salud pública, específicamente en los Consejos Territoriales de Salud Ambiental, responsables de atender las necesidades y problemáticas sanitarias y ambientales de un territorio. Estos consejos establecen pautas, procedimientos y estrategias para prevenir y mitigar las malas prácticas ambientales, promoviendo así el cuidado de la salud pública entre entidades gubernamentales y de las comunidades.

Dentro de las estrategias que se promueven son aquellas basadas en la naturaleza, las cuales aprovechan los servicios ecosistémicos proporcionados por la flora para mitigar la contaminación atmosférica. La evaluación de los costos económicos derivados del impacto en la salud abre la puerta a oportunidades para reducir el gasto público en salud y aumentar la inversión en soluciones ambientales. Estas soluciones no solo pueden resultar económicas, sino que también pueden abordar otras problemáticas ambientales, beneficiando así al sector social en su conjunto.

De este modo, es posible determinar el impacto real del aumento de emisiones en una ciudad debido al uso excesivo de vehículos motorizados, destacando no solo su influencia en el medio ambiente y la salud, sino también el costo económico asociado a la inacción en la mitigación de estos problemas que afectan directamente la calidad del aire.

Este enfoque fomentaría la investigación y el interés por determinar las acciones que se están llevando a cabo para reducir las concentraciones de contaminantes en la atmósfera, alentando a los entes gubernamentales a promover el desarrollo sostenible en las regiones. Asimismo, permitiría anticipar y prevenir futuros problemas derivados del aumento de emisiones de contaminantes como el material particulado, minimizando su impacto en la salud pública mediante acciones perdurables en el tiempo.

Conclusiones

Al caracterizar el área de estudio, se analizó la relación entre las fuentes móviles y las concentraciones medidas de $PM_{2.5}$ y PM_{10} . Se determinó que los principales puntos de atracción del tráfico vehicular, que registran un mayor número de desplazamientos diarios por tipo de vehículo motorizado, son el centro urbano y las principales vías de la ciudad como la salida a Bogotá y la Vía hacia Puerto López. Estas áreas coincidieron con las concentraciones más altas de material particulado, específicamente con el $PM_{2.5}$, el cual presenta un Riesgo Relativo mayor en comparación con el PM_{10} . Esta correlación sugiere una asociación entre la inhalación de partículas en suspensión y los casos de IRA en la población de Villavicencio. Asimismo, se establece una relación directa entre los costos asociados a las hospitalizaciones y el material particulado emitido por las fuentes móviles, los cuales están directamente ligados a las afecciones respiratorias tal como se observó en las comparaciones realizadas.

En este sentido, se resalta que las principales afectaciones se encuentran en rangos de 5 a 19 años y mayores a 60 años. Esto permite concluir que todos los desplazamientos esporádicos, ya sea a pie, en bicicleta, durante caminatas urbanas, visitas a parques u otras actividades de movilidad en espacios abiertos, están asociadas a una exposición a partículas en suspensión debido a la escasez de coberturas vegetales. Esta situación facilita que los materiales particulados lleguen directamente a los transeúntes, especialmente en áreas donde se encuentran parques contiguos a vías, ciclorrutas entre otras.

Se planteó un modelo matemático el cual permitió identificar que, en términos de los casos atribuibles, los costos asociados a las hospitalizaciones por IRA podrían superar los COP 30 mil millones para el año 2042, mostrando un crecimiento exponencial. Este escenario puede ser mitigado mediante la implementación de estrategias de remediación ambiental. Al comparar estos costos futuros con una estrategia de mitigación ambiental, se observó un cambio en el comportamiento del modelo. Se identifica un rango de sostenibilidad que concluye en un escenario de futuro ideal, en el cual las enfermedades persisten y los costos tangibles asociados a su tratamiento no desaparecen, pero alcanzan un punto de normalización. Esta situación proporciona información valiosa para la gestión de gastos del municipio, permitiendo su preparación durante al menos 16 años para hacer frente a los crecientes costos de hospitalización por IRA, de acuerdo con

las estimaciones. La implementación de estrategias de mitigación podría eventualmente homogenizar estos costos en el tiempo y detener su crecimiento exponencial.

Las acciones propuestas resultan ser fundamentales para abordar los desafíos ambientales actuales y futuros en la ciudad de Villavicencio. A través de iniciativas como la propuesta planteada en este estudio, se puede lograr la revegetalización de los corredores de desplazamiento urbano. Esto conlleva a la creación de un arbolado urbano que no solo embellece a la ciudad, sino que también incide positivamente en la reducción de material particulado. Más allá de la estética, este proceso de revegetalización contribuye significativamente a la salud ambiental y problemáticas ambientales derivadas de la ausencia de estas coberturas vegetales. Esto posibilita la creación de espacios urbanos mejorados para los transeúntes, que podrían ser ideados como anillos de alamedas bien estructuradas de carácter institucional, destinadas al uso recreativo.

Finalmente, el desarrollo de esta investigación ha revelado la ausencia de estudios locales en el ámbito de la economía ambiental, cuya importancia radica en la evaluación de los costos asociados a problemáticas ambientales. Estos costos pueden impactar el capital público de un gobierno municipal. La falta de regulación contribuye al deterioro continuo del medio ambiente, especialmente en un contexto global marcado por el cambio climático. Se hace un llamado a las entidades territoriales para que coordinen esfuerzos y colaboren en la recopilación de datos, así como en la realización de estudios epidemiológicos.

Recomendaciones

1. Implementar un sistema de monitoreo continuo de la calidad del aire en Villavicencio, utilizando sensores de alta precisión distribuidos estratégicamente en toda el área urbana priorizando los sectores del Barzal y el centro, fortaleciendo la capacidad institucional y técnica del municipio para gestionar la calidad del aire, incluyendo la formación de personal especializado en monitoreo ambiental y la adquisición de equipos de última generación para el análisis de datos. Esto permitirá recopilar datos en tiempo real sobre los niveles de material particulado $PM_{2.5}$ y PM_{10} , así como otras sustancias nocivas en el aire que afectan la salud de los ciudadanos.

2. Establecer una red de comunicación entre las entidades territoriales, los centros de salud y los investigadores para compartir datos epidemiológicos y ambientales. Esto facilitará el análisis conjunto de la relación entre las partículas en suspensión y las enfermedades respiratorias, permitiendo una respuesta más efectiva y coordinada que se enfoque en la prevención.

3. Promover políticas locales que fomenten el uso de medios de transporte más limpios y eficientes, como el transporte público eléctrico o el fomento del uso de la bicicleta. Reducir la dependencia del transporte privado motorizado ayudará a disminuir las emisiones de contaminantes atmosféricos y mejorar la calidad del aire en la ciudad, creando herramientas e instrumentos de control y seguimiento que hagan un uso efectivo de la normatividad existente asociadas a las emisiones de contaminantes atmosféricos por parte de las industrias y los vehículos, sacando de circulación aquellos buses y busetas con más de 20 años en circulación que contaminan 6 veces más que los modernos, así como implementar programas de incentivos para aquellas empresas y ciudadanos que adopten prácticas sostenibles en sus actividades diarias.

4. Se sugiere utilizar esta investigación como punto de partida para la implementación de estrategias de educación ambiental que destaquen la importancia de los procesos de revegetalización y cómo estos contribuyen a mejorar la calidad del aire, beneficiando así la salud ambiental y social.

El empleo de esta investigación en campañas de concientización dirigidas a la población es fundamental para informar sobre los riesgos para la salud asociados con la contaminación del aire. Es necesario fomentar medidas preventivas, como evitar la exposición prolongada en zonas con una alta concentración de contaminantes y el uso de mascarillas respiratorias en situaciones de elevada contaminación. Además, es esencial motivar tanto al sector público como al privado a

invertir en investigaciones de este tipo y en el desarrollo de tecnologías limpias y sostenibles que reduzcan las emisiones de contaminantes atmosféricos. En particular, especialmente aquellas provenientes de las fuentes móviles, dado que acciones de este tipo no solo mejorarán la calidad del aire, sino que también tendrá un impacto positivo en la salud de la población y en el medio ambiente en general.

Referencias

- Abidin, A., Binazir, F., Hadi, S., Yoneda, M., & Matsui, Y. (2023). Exposure particulate matter (PM_{2.5}) and health risk assessment on informal workers in landfill site, Indonesia. *Environmental Challenges*, 13(1), 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2023.100795>
- Abt Associates Inc. (2010). *Technical Support Document for the Powerplant impact Estimator Software Tool*. The Clean Air Task Force. <https://www.catf.us/resource/technical-support-document/>
- Agudelo, J. (2017). *Articulación Universidad -Empresa -Estado para establecer los factores de emisión reales de fuentes móviles en el Valle de Aburrá – FEVA*. Universidad de Antioquia. <https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/Biblioteca-aire/Estudios-calidad-del-aire/Factores-de-emision.pdf>
- Alcaldía de Villavicencio. (2021). *Plan de Desarrollo de Villavicencio para el período 2020-2023*. Alcaldía de Villavicencio. <https://turismovillavicencio.gov.co/web/wp-content/uploads/2022/01/Plan-de-Desarrollo-Villavicencio-Cambia-Contigo-2020-2023.pdf>
- Alcaldia de Villavicencio. (2022). *Consultoría para la actualización de la formulación del plan maestro de movilidad sostenible y segura y la estructuración técnica, legal, financiera y social del sistema estratégico de transporte público de Villavicencio*. Secretaría de Movilidad.
- Alcaldía de Villavicencio. (2023). *Boletín epidemiológico consolidado, eventos en salud pública*. Secretaría de Salud.
- Alcaldía de Villavicencio. (2023). *Plan de acción local para mejorar la calidad del aire de Villavicencio*. Secretaría de Medio Ambiente.
- Aldunate, P., Paz, O., & Halvorsen, K. (2006). Los efectos de la contaminación atmosférica por PM₁₀ sobre la salud ciudad de La Paz- Bolivia (3650 m.s.n.m.). *Acta Nova*, 3(2), 422-442. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?pid=S1683-07892006000100019&script=sci_abstract
- Alfonso Ávila, J. (2023). Emisiones de contaminantes atmosféricos por el transporte terrestre por carretera en Colombia. *[Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]*. Repositorio institucional. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/83873>

- Alvarado, A., & Munzón, M. (2020). Evaluación de la efectividad de gel de sábila y agua de coco como enraizantes naturales en diferentes sustratos para propagación asexual de árboles de *Ficus benamina*. *Agronomía Costarricense*, 44(1), 65-77. <https://doi.org/10.15517/rac.v44i1.40002>
- Álvarez Niño, K. (2022). Efectos de la contaminación atmosférica sobre la salud: análisis descriptivo y revisión de literatura. [Trabajo de grado, Universidad EAFIT]. Repositorio Institucional. <http://hdl.handle.net/10784/31703>
- Ara, S., & Tekeşin, C. (2016). The monetary valuation of acute respiratory illness from air pollution in Turkey. *Atmospheric Pollution Research*, 7(1), 82-91. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2015.07.008>
- Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento (BIRF). (8 de septiembre de 2016). *La contaminación atmosférica le cuesta USD 225 mil millones a la economía mundial*. Banco Mundial. <https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2016/09/08/air-pollution-deaths-cost-global-economy-225-billion#:~:text=La%20contaminaci%C3%B3n%20atmosf%C3%A9rica%20le%20cuesta%20USD%20225%20mil%20millones%20a%20la%20econom%C3%ADa%20mundial>
- Barra López, D. (2019). Análisis del efecto del arbolado urbano sobre la absorción de material particulado respirable (MP2,5), mediante el software i-Tree Eco al interior del Parque Ecuador en la ciudad de Concepción. [Trabajo de grado, Universidad de Chile]. Repositorio Institucional. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/170493>
- Barwise, Y., Kumar, P., Abhijith, K., Gallagher, J., McNabola, A., & Watts, J. (2024). A trait-based investigation into evergreen woody plants for traffic-related air pollution mitigation over time. *Science of The Total Environment*, 914(169713), 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169713>
- Bernal, C., Carvajal, H., & Alvis, N. (2017). Costos económicos de la infección respiratoria aguda en un Municipio de Colombia. *Revista de la Universidad Industrial de Santander*, 49(3), 470-477. <https://doi.org/10.18273/revsal.v49n3-2017005>
- Camacho Pérez, B., & Ramírez Hernández, L. (2020). Propuesta de ajuste a la concentración del límite máximo permisible de la normatividad en materia de calidad del aire en Colombia. [Trabajo de grado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. Repositorio Institucional. <http://hdl.handle.net/11349/26028>

- Cao , Z., Wu, X., Wang, T., Zhao, Y., Zhao, Y., Wei, Y., & Guangxuan , Y. (2022). Characteristics of airborne particles retained on conifer needles across China in winter and preliminary evaluation of the capacity of trees in haze mitigation. *Science of The Total Environment*, 802(150704), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150704>
- Cardona Arango, K., & Bermúdez Zapata, V. (2019). Arbolado urbano como estrategia de gestión de la calidad del aire. [*Trabajo de grado, Universidad de Antioquia*]. Repositorio Institucional. <https://hdl.handle.net/10495/15906>
- Carriazo, F., Ibañez, A., & García, M. (2003). *Valoración de los beneficios económicos provistos por el sistema de parques nacionales naturales: una aplicación del análisis de transferencia de beneficios*. Universidad de los Andes. <https://doi.org/10.57784/1992/8524>
- Castro Alzate, S., & Garzón Gil, J. (2022). Evaluación de la capacidad de retención de material particulado atmosférico por parte del arbolado urbano empleando la metodología UFORE. [*Trabajo de grado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas*]. Repositorio Institucional. <http://hdl.handle.net/11349/34656>
- Chen, L., Liu, C., Zhang, L., Zou, R., & Zhang, Z. (2017). Variation in Tree Species Ability to Capture and Retain Airborne Fine Particulate Matter (PM_{2.5}). *Scientific Reports*, 7(3206), 1-11. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-03360-1>
- Clean Air Institute (CAI). (2013). *Estrategias Ambientales Integradas. Proyecto: Desarrollo de una Estrategia Ambiental Integrada para una movilidad sustentable en el área metropolitana del Valle de Aburrá*. Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA). <https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/Biblioteca-aire/Estudios-calidad-del-aire/Informe-fase-1-estrategias-ambientales-integradas.pdf>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2021). *Salud y cambio climático: metodologías y políticas públicas*. CEPAL. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/47534/1/2100956_es.pdf
- Corporación para el Desarrollo Sostenible del área de Manejo Especial La Macarena (Cormacarena). (2020). *Informe de Gestión Documento Preliminar 2020*. Cormacarena. https://cormacarena.micolombiadigital.gov.co/sites/cormacarena/content/files/000017/844_documento-preliminar-informe-gestion-2020.pdf
- Cummings, P. (2019). Chapter 2. Risks and Rates. En *Analysis of Incidence Rates* (págs. 9-29). CRC Press.

- https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=AwqWDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Analysis+of+Incidence+Rates+Peter+Cummings&ots=jOBc_PVcEr&sig=DQwNcRhRdK3VJwIpBCJJVvE20OE
- Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (DANE). (2021). *La información del DANE en la toma de decisiones regionales*. DANE. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/informacion-regional/informacion-estadistica-desagregada-con-enfoque-territorial-y-diferencial/informacion-del-dane-para-la-toma-de-decisiones-en-departamentos-y-ciudades-capitales>
- Dominici, F., Peng, R., Bell, M., Pham, L., McDermott, A., Zeger, S., & Samet, J. (2006). Fine Particulate Air Pollution and Hospital Admission for Cardiovascular and Respiratory Diseases. *JAMA*, 295(10), 1127-1134. <https://doi.org/10.1001/jama.295.10.1127>
- Environmental Protection Agency (EPA). (2005). Chapter 5: Health Effects Analysis. En *The Integrated Environmental Strategies Handbook* (págs. 51-60). EPA. https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?Lab=OAP&dirEntryId=83005
- Environmental Protection Agency (EPA). (03 de octubre de 2023a). *Environmental Benefits Mapping and Analysis Program – Community Edition*. EPA. https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-04/documents/benmap-ce_user_manual_march_2015.pdf
- Environmental Protection Agency (EPA). (26 de junio de 2023b). *Environmental Protection Agency (EPA)*. Conceptos básicos sobre el material particulado (PM, por sus siglas en inglés): <https://espanol.epa.gov/espanol/conceptos-basicos-sobre-el-material-particulado-pm-por-sus-siglas-en-ingles>
- Fajardo, A. (2017). Measurement in epidemiology: prevalence, incidence, risk, impact measures. *Revista alergia México*, 64(1), 109-120. <https://doi.org/10.29262/ram.v64i1.252>
- Fallahizadeh, S., Kermani, M., Esrafil, A., Asadgol, Z., & Gholami, M. (2021). The effects of meteorological parameters on PM10: Health impacts assessment using AirQ+ model and prediction by an artificial neural network (ANN). *Urban Climate*, 38(1), 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100905>
- Fares, S., Conte, A., Alivernini, A., Chianucci, F., Grotti, M., Zappitelli, I., Petrella, F., & Corona, P. (2020). Testing Removal of Carbon Dioxide, Ozone, and Atmospheric Particles by Urban

- Parks in Italy. *Environmental Science & Technology*, 54(23), 14910-14922. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c04740>
- Gaglio, M., Pace, R., Nicoletta, A., Grote, R., Castaldelli, G., Calfapietra, C., & Fano, A. (2022). Species-specific efficiency in PM_{2.5} removal by urban trees: From leaf measurements to improved modeling estimates. *Science of The Total Environment*, 844(157131), 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157131>
- García Peralta, J. (2021). Variabilidad temporal de los contaminantes del aire PM₁₀ y PM_{2.5} en el corredor vial Cajicá-Zipacquirá, Cundinamarca. [Trabajo de grado, Universidad Militar Nueva Granada]. Repositorio Institucional. <http://hdl.handle.net/10654/41513>
- Gee, G., & Payne, D. (2004). Environmental Health Disparities: A Framework Integrating Psychosocial and Environmental Concepts. *Environmental Health Perspectives*, 112(17), 1645-1653. <https://doi.org/10.1289/ehp.7074>
- Gil, M. (01 de febrero de 2023). Los vehículos llegan a 18 millones en 2022, según el Registro Único de Transporte. La República: <https://www.larepublica.co/empresas/los-vehiculos-llegan-a-18-millones-en-2022-segun-el-registro-unico-de-transporte-3534667>
- González Guzmán, J. (2003). Rediseño de la red para el monitoreo de calidad del aire en los municipios de Ibagué, Espinal y San Luis - Payandé. [Trabajo de grado, Universidad de la Salle]. Repositorio Institucional. https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/1331
- González Pérez, A. (2017). Valoración económica y social de los efectos generados por la contaminación atmosférica en la salud de los habitantes en el área urbana de Villavicencio - Meta, Colombia. [Trabajo de grado, Universidad Santo Tomás]. Repositorio Institucional. <http://repository.usta.edu.co/handle/11634/12381>
- Gouveia, N. (2003). Poluição do ar e efeitos na saúde nas populações de duas grandes metrópoles brasileiras. *Epidemiologia e Serviços de Saúde*, 12(1), 29-40. <https://doi.org/10.5123/S1679-49742003000100004>
- Gustafsson, M., Linden, J., Johansson, E., Ågot, Watne, Håkan, & Pleijel. (2024). Air pollution removal with urban greenery – Introducing the Vegetation Impact Dynamic Assessment model (VIDA). *Atmospheric Environment*, 323(120397), 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2024.120397>

- Han, D., Shen, H., Duan, W., & Chen, L. (2020). A review on particulate matter removal capacity by urban forests at different scales. *Urban Forestry & Urban Greening*, 48(126565), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.126565>
- Hernández, L., Aristizábal, G., Salgado, Y., Cantor, L., Medina, K., & Reyes, J. (2012). Asociación entre la contaminación del aire y la morbilidad por enfermedad respiratoria aguda en menores de cinco años en tres localidades de Bogotá. *Sociedad Colombiana de Pediatría*, 45(2), 124-138. [https://doi.org/10.1016/S0120-4912\(15\)30011-2](https://doi.org/10.1016/S0120-4912(15)30011-2)
- Hernández, M. (2007). VII. Estudios de casos y controles. En *Epidemiología Diseño y análisis de estudios* (págs. 139-181). Panamericana. https://books.google.com.co/books?id=A97ke8RlhrkC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbg_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- Hilde, T., & Paterson, R. (2014). Integrating ecosystem services analysis into scenario planning practice: Accounting for street tree benefits with i-Tree valuation in Central Texas. *Journal of Environmental Management*, 146(1), 524-534. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.05.039>
- Hou, Q., An, X., Tao, Y., & Sun, Z. (2016). Assessment of resident's exposure level and health economic costs of PM10 in Beijing from 2008 to 2012. *Science of The Total Environment*, 563-564(1), 557-565. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.215>
- Ito, K. (2003). Associations of particulate matter components with daily mortality and morbidity in Detroit, Michigan. En *Revised analyses of time-series studies of air pollution and health. Special report* (págs. 143-156). Health Effects Institute (HEI). <https://www.healtheffects.org/publication/revised-analyses-time-series-studies-air-pollution-and-health>
- Jeong, N., Kim, K., Yoon, J., Han, S., & You, S. (2020). Evaluation on the Potential of 18 Species of Indoor Plants to Reduce Particulate Matter. *Journal of People Plants Environment*, 23(6), 637-646. <https://doi.org/10.11628/ksppe.2020.23.6.637>
- Joshi, N., Joshi, A., & Bist, B. (2020). Chapter 5. Phytomonitoring and Mitigation of Air Pollution by Plants. En *Sustainable Agriculture in the Era of Climate Change* (págs. 113-142). Springer. <https://link-springer-com.crai-ustadigital.usantotomas.edu.co/book/10.1007/978-3-030-45669-6>

- Juodis, L., Filistovič, V., Maceika, E., & Remeikis, V. (2016). Analytical dispersion model for the chain of primary and secondary air pollutants released from point source. *Atmospheric Environment*, 128(1), 216-226. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.12.019>
- Kamarehie, B., Ghaderpoori, M., Jafari, A., Karami, M., Mohammadi, A., Azarshab, K., Ghaderpoury, A., & Noorizadeh, N. (2017). Estimation of health effects (morbidity and mortality) attributed to PM10 and PM2.5 exposure using an Air Quality model in Bukan city, from 2015-2016 exposure using air quality model. *Environmental Health Engineering and Management Journal*, 4(3), 137-142. <https://doi.org/10.15171/EHEM.2017.19>
- Kermani, M., Arfaeinia, H., & Masroor, K. (2022). Health impacts and burden of disease attributed to long-term exposure to atmospheric PM10/PM2.5 in Karaj, Iran: effect of meteorological factors. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 102(18), 1-17. <https://doi.org/10.1080/03067319.2020.1807534>
- Khoshakhlagh, A., Mohammadzadeh, M., & Morais, S. (2023). Air quality in Tehran, Iran: Spatio-temporal characteristics, human health effects, economic costs and recommendations for good practice. *Atmospheric Environment: X*, 19(1), 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2023.100222>
- Kwak, M., Lee, J., Park, S., Lim, Y., Kim, H., Jeong, S., Son, J.-a., Je, S., Chang, H., Oh, C.-Y., Kim, K., & Woo, S.Y. (2023). Understanding Particulate Matter Retention and Wash-Off during Rainfall in Relation to Leaf Traits of Urban Forest Tree Species. *Horticulturae*, 9(2), 165. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9020165>
- Laden, F., Neas, L., Dockery, D., & Schwartz, J. (2000). Association of fine particulate matter from different sources with daily mortality in six U.S. cities. *Environmental Health Perspectives*, 108(10), 941-947. <https://doi.org/10.1289/ehp.00108941>
- Leiva, M. A., Santibañez, D., & Ibarra, S. (2013). A five-year study of particulate matter (PM2.5) and cerebrovascular diseases. *Environmental Pollution*, 181(1), 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.05.057>
- Lindén, J., Gustafsson, M., Uddling, J., Watne, Å., & Pleijel, H. (2023). Air pollution removal through deposition on urban vegetation: The importance of vegetation characteristics. *Urban Forestry & Urban Greening*, 81(1), 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2023.127843>

- Martínez Hernández, A. (2017). Captura de material particulado en hojas de árboles del Municipio de Toluca, Estado de México. [*Trabajo de grado, Universidad Autónoma del Estado de México*]. Repositorio Institucional. <http://hdl.handle.net/20.500.11799/66256>
- Mendéz Montiel, B. (2014). Caracterización forestal de los parques en las comunas cuatro y cinco como contribución al plan de ornato del municipio de Villavicencio. [*Trabajo de grado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD)*]. Repositorio Institucional. <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/20335>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2008). Resolución 909 del 2008. Por la cual se establecen las normas y estándares de emisión admisibles de contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas y se dictan otras disposiciones. Diario oficial No. 47.051. Obtenido de https://www.redjurista.com/Documents/resolucion_909_de_2008_ministerio_de_ambiente,_vivienda_y_desarrollo_territorial.aspx#
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). Resolución 2254 de 2017. Por la cual se adopta la norma de calidad del aire ambiente y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial No. 50415. Obtenido de <https://alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=82634>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2022). Resolución 0762 de 2022. Por la cual se reglamentan los límites máximos permisibles de emisión de contaminantes que deberán cumplir las fuentes móviles terrestres, se reglamentan los artículos 2.2.5.1.6.1, 2.2.5.1.8.2 y 2.2.5.1.8.3 del Decreto 1076 de 2015. Diario Oficial 52120. Obtenido de <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=137537>
- Ministerio de Salud y Protección Social. (23 de agosto de 2021). *Minsalud comprometido con la calidad del aire*. Ministerio de Salud y Protección Social: <https://www.minsalud.gov.co/Paginas/Minsalud-comprometido-con-la-calidad-del-aire-.aspx>
- Moamer, S., Faradmal, J., & Leili, M. (2023). Short-term effects of air pollution on hospital admissions of respiratory diseases in Hamadan, Iran, 2015 to 2021. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(1), 97900-97910. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-29328-5>
- Morales, T., & Arias, J. (2013). Contaminación vehicular en la conurbación Pereira - Dosquebradas. *Luna Azul*, 1(37), 101-129. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-24742013000200009

- Moura, B. B., Manzini, J., Zammarchi, F., Yasutomo, H., Brilli, L., Gioli, B., Zaldei, A., Giordano, T., Martinelli, F., & Ferrini, F. (2024). Assessment of seasonal variations in particulate matter accumulation and elemental composition in urban tree species. *Environmental Research*, 252(118782), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118782>
- Muhammad, S., Wuyts, K., & Samson, R. (2020). Immobilized atmospheric particulate matter on leaves of 96 urban plant species. *Research Article*, 27(1), 36920-36938. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09246-6>
- Múnera, J., & Correa, F. (2004). Valoración económica de los costos ambientales: Marco conceptual y métodos de estimación. *Semestre Económico*, 7(13), 160-192. <https://revistas.udem.edu.co/index.php/economico/article/view/1141>
- Muñoz, D., Villada, M., Rivera, P., Reyna, M., Osornio, A., & Martínez, A. (2020). Stated benefits from air quality improvement through urban afforestation in an arid city – A contingent valuation in Mexicali, Baja California, Mexico. *Urban Forestry & Urban Greening*, 55(1), 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126854>
- Nam, E., Fulper, C., Warila, J., Somers, J., Michaels, H., Baldauf, R., Rykowski, R., & Scarbro, C. (2008). *Analysis of Particulate Matter Emissions from Light-Duty Gasoline Vehicles in Kansas City*. Environmental Protection Agency (EPA). https://cfpub.epa.gov/si/si_public_file_download.cfm?p_download_id=499633
- Newnan, D., Eschenbach, T., & Lavelle, J. (2004). Chapter 14: Inflation and Price Change. En *Engineering Economic Analysis, Volumen 1* (págs. 476-510). Oxford University Press. https://books.google.com.co/books?id=ejqZKLerceYC&printsec=copyright&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- Odo, D., Yang, I., Dey, S., Hammer, M., Donkelaar, A. v., Martin, R., Dong, G., Yang, B., Hystad, P., & Knibbs, L. (2022). Ambient air pollution and acute respiratory infection in children aged under 5 years living in 35 developing countries. *Environment International*, 159(107019), 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.107019>
- Orellano, P., Ciapponi, A., Reynoso, J., & Quaranta, N. (2020). Short-term exposure to particulate matter (PM10 and PM2.5), nitrogen dioxide (NO2), and ozone (O3) and all-cause and cause-specific mortality: Systematic review and meta-analysis. *Environment International*, 142(1), 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105876>

- Organization for Economic Co-operation and Development (OECD). (2016). *The economic consequences of outdoor air pollution*. OECD. <https://www.oecd.org/environment/indicators-modelling-outlooks/Policy-Highlights-Economic-consequences-of-outdoor-air-pollution-web.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). (04 de abril de 2022). *El 99% de la población mundial respira aire contaminado*. ONU: <https://news.un.org/es/story/2022/04/1506592>
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). (24 de abril de 2023). *Una población en crecimiento*. ONU: <https://www.un.org/es/global-issues/population#:~:text=Una%20poblaci%C3%B3n%20en%20crecimiento&text=Se%20estima%20que%20la%20poblaci%C3%B3n,millones%20para%20mediados%20de%202080>.
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2006). *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre*. Ginebra: OMS. https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/69478/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (02 de mayo de 2018). *Nueve de cada diez personas de todo el mundo respiran aire contaminado*. OMS: <https://www.who.int/es/news/item/02-05-2018-9-out-of-10-people-worldwide-breathe-polluted-air-but-more-countries-are-taking-action>
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (19 de diciembre de 2022). *Contaminación del aire ambiente (exterior)*. OMS: [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- Ortega, J., Martínez, I., Boldo, E., Cárcelos, A., Solano, C., Ramis, R., Aguilar, E., Sánchez, M., & López, F. (2020). Urban air pollution and hospital admissions for asthma and acute respiratory disease in Murcia city (Spain). *Anales de Pediatría (English Edition)*, 93(2), 95-102. <https://doi.org/10.1016/j.anpede.2020.01.006>
- Ortiz, E., & Rojas, N. (2013). Estimación de los beneficios económicos en salud asociados a la reducción de PM10 en Bogotá. *Salus Pública*, 15(1), 90-102. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0124-00642013000100009&lng=e&nrm=iso&tlng=es

- Pace, R., & Rüdiger, G. (2020). Deposition and Resuspension Mechanisms Into and From Tree Canopies: A Study Modeling Particle Removal of Conifers and Broadleaves in Different Cities. *Urban Green Space and Air Quality*, 3(26), 1-12. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2020.00026>
- Peláez, O., Santamaría, Y., Becerra, J., & Oliveros, G. (2010). *Agenda Ambiental del Municipio de Ibagué Resumen ejecutivo*. Corporación Autónoma Regional del Tolima (CORTOLIMA). https://cimpp.ibague.gov.co/wp-content/uploads/2019/11/AGENDA-AMBIENTAL-MUNICIPAL-VERSI%C3%93N-COMPLETA_reduce.pdf
- Pérez, L., Sunyer, J., & Kunzli, N. (2009). Estimating the health and economic benefits associated with reducing air pollution in the Barcelona metropolitan area (Spain). *Gaceta Sanitaria*, 23(4), 287-294. <https://doi.org/10.1016/j.gaceta.2008.07.002>
- Periódico del Meta. (02 de septiembre de 2022). *Crece parque automotor en Villavicencio*. Periódico del Meta: <https://periodicodelmeta.com/crece-parque-automotor-en-villavicencio/#:~:text=%E2%80%9CEste%20a%C3%B1o%20el%20precio%20de,julio%20de%202021%20vs%202022>
- Placeres, D. M., Olite, L., & Álar, D. (2006). La contaminación del aire: su repercusión como problema de salud. *Revista Cubana de Higiene y Epidemiología*, 44(2), 44-2. http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=s1561-30032006000200008&script=sci_abstract&tlng=es
- Plaia, A., & Bondi, A. (2006). Single imputation method of missing values in environmental pollution data sets. *Atmospheric Environment*, 40(38), 7316-7330. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.06.040>
- Pope, C., Burnett, R., Thun, M., Calle, E., Krewski, D., Ito, K., & Thurston, G. (2002). Lung Cancer, Cardiopulmonary Mortality, and Long-Term Exposure to Fine Particulate Air Pollution. *JAMA*, 287(9), 1132-1141. <https://doi.org/10.1001/jama.287.9.1132>
- Presidencia de la República de Colombia. (2004). Decreto 1200 de 2004. Por el cual se determinan los instrumentos de planificación ambiental y se adoptan otras disposiciones. Diario Oficial 45526. Obtenido de <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=13550>
- Presidencia de la República de Colombia. (2015). Decreto 1076 de 2015. Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible.

- Diario Oficial No. 49523. Obtenido de <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=62511>
- Priyankara, S., Senarathna, M., Jayaratne, R., Morawska, L., Abeysundara, S., Weerasooriya, R., Knibbs, L., Dharmage, S., Yasaratne, D., & Bowatte, G. (2021). Ambient PM_{2.5} and PM₁₀ Exposure and Respiratory Disease Hospitalization in Kandy, Sri Lanka. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(18), 1-13. <https://doi.org/10.3390/ijerph18189617>
- Puerto Avila, J., & Ramírez Lora, G. (2015). Metodología para realizar inventarios de fuentes móviles de contaminación atmosférica en la ciudad de Cartagena. [Trabajo de grado, Universidad de Cartagena]. Repositorio Institucional. <https://hdl.handle.net/11227/1542>
- Querol, X., Viana, M., Moreno, T., Alastuey, A., Pey, J., Amato, F., Pandolfi, M., Cruz, M., Reche, C., Pérez, N., González, A., Pallarés, M., Moral, A., Monfort, E., Escrig, A., & Cristóbal, Á. (2012). *Bases científico-técnicas para un Plan Nacional de Mejora de la Calidad del Aire*. CSIC. <https://www.csic.es/es/ciencia-y-sociedad/libros-de-divulgacion/coleccion-informes/bases-cientifico-tecnicas-para-un-plan-nacional-de-mejora-de-la-calidad-del-aire>
- Quijano, A., Quijano, M., & Henao, J. (2010). Caracterización fisicoquímica del material particulado-fracción respirable PM_{2.5} en Pamplona-Norte de Santander-Colombia. *Bistua*, 8(1), 53-66. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=90315226007>
- Restrepo Peña, H. (2019). Valoración económica de los efectos en la salud humana debidos a las emisiones de contaminantes a la atmósfera generados por camiones. [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Institucional. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/76784>
- Reynaldo, L., & Reynaldo, C. (2018). Costo de enfermedades respiratorias agudizadas por contaminación ambiental. *Restos de la Dirección*, 12(1), 82-95. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2306-91552018000100005
- Rodríguez, S., & Violante, A. (2018). Análisis de comportamiento del material particulado menor a 10 micras en los inviernos en la ciudad de Salamanca. *Ingenierías y Tecnología*, 4(1), 3342-3346. <https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/2844>

- Rojas, D., Salazar, J., Montoya, D., & Muñoz, É. (2020). Problemática de la contaminación del aire en Colombia. *Revista Ambiental ÉOLO*, 18(1), 109-122. <http://revistaeolo.fconvida.org/index.php/eolo/article/view/12>
- Romero, M., Más, P., Lacasaña, M., Téllez, M., Aguilar, J., & Romieu, I. (2004). Contaminación atmosférica, asma bronquial e infecciones respiratorias agudas en menores de edad, de la Habana. *Salud Pública de México*, 46(3), 222-233. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0036-36342004000300012
- Salazar Rojas, T. (2023). Generación de un modelo de monitoreo de la contaminación atmosférica por metales pesados en zonas de flujo vehicular, basado en las propiedades magnéticas de biomonitores y polvo urbano. [Tesis Doctoral, Tecnológico de Costa Rica]. Repositorio Institucional. <https://hdl.handle.net/2238/14417>
- Sampieri, R., Collado, C., & Baptista, P. (2014). Capítulo 5: Definición del tipo de investigación que se realizara: exploratorio, descriptivo, correlacional o explicativo. En *Metodología de la Investigación* (págs. 88-101). Mc GRAW-HILL. <https://www.esup.edu.pe/wp-content/uploads/2020/12/2.%20Hernandez,%20Fernandez%20y%20Baptista-Metodolog%C3%ADa%20Investigacion%20Cientifica%206ta%20ed.pdf>
- Sekercioglu, Ç. H., Richard, P., & Wormworth, J. (2012). The effects of climate change on tropical birds. *Biological Conservation*, 1(1-18), 148. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2011.10.019>
- Shaneyfelt, K., Anderson, A., Kumar, P., & Hunt, W. (2017). Air quality considerations for stormwater green street design. *Environmental Pollution*, 231(1), 768-778. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.08.081>
- Silva, M. (2019). Perfil epidemiológico de infecciones respiratorias agudas en adultos hospitalizados. *Revista Universitaria con proyección científica, académica y social*, 3(3), 112-119. <https://doi.org/10.31243/mdc.uta.v3i3.196.2019>
- Soleimani, M., Akbari, N., Saffari, B., & Haghshenas, H. (2022). Health effect assessment of PM2.5 pollution due to vehicular traffic (case study: Isfahan). *Journal of Transport & Health*, 24(1), 1-22. <https://doi.org/10.1016/j.jth.2022.101329>
- Song, W., & Kwan, M.-P. (2023). Air pollution perception bias: Mismatch between air pollution exposure and perception of air quality in real-time contexts. *Health & Place*, 84(1), 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.healthplace.2023.103129>

- Steinparzer, M., Schaubmayr, J., Godbold, D., & Rewald, B. (2023). Particulate matter accumulation by tree foliage is driven by leaf habit types, urbanization- and pollution levels. *Environmental Pollution*, 335(122289), 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122289>
- Tolosa, N. (2019). *Análisis de situación de salud Villavicencio, año 2019*. Secretaría de Salud de Villavicencio. <https://historico.villavicencio.gov.co/Documents/AN%C3%81LISIS%20DE%20SITUACION%C3%93N%20DE%20SALUD%20VILLAVICENCIO%20A%C3%91O%202019.pdf>
- Tomson, M., Kumar, P., Abhijith, K., & Watts, J. (2024). Exploring the interplay between particulate matter capture, wash-off, and leaf traits in green wall species. *Science of The Total Environment*, 921(170950), 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170950>
- Tran, P., Kalairasan, M., Beshay, P., Qi, Y., Fern, L., Govindasamy, V., Lokman, M., Ghosh, S., & Balasubramanian, R. (2022). Nature-based solution for mitigation of pedestrians' exposure to airborne particles of traffic origin in a tropical city. *Sustainable Cities and Society*, 87(104264), 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104264>
- Ueda, K. (2023). Particulate Matter/PM2.5. En *Handbook of Air Quality and Climate Change* (págs. 745-765). Springer Nature Singapore Pte Ltd. <https://link-springer-com.crai-ustadigital.usantotomas.edu.co/referencework/10.1007/978-981-15-2760-9>
- Vargas, S., Onatra, W., Osorno, L., & Páez, E. (2008). Contaminación atmosférica y efectos respiratorios en niños, en mujeres embarazadas y en adultos mayores. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 11(1), 31-45. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0123-42262008000100006&lng=e&nrm=iso&tlng=en
- Vásquez, A., Tarraga, A., Tarraga, L., Romero, M., & Tárraga, P. (2022). Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica y comorbilidad. *Journal of Negative and No Positive Results*, 5(10), 1195-1220. <https://doi.org/10.19230/jonnpr.3863>
- Vásquez, M., & Arroyave, M. (2019). Clasificación de especies arbóreas según su capacidad para remover material particulado del aire en el Valle de Aburrá. *Revista EIA*, 16(32), 229-242. <https://doi.org/10.24050/reia.v16i32.1270>

- Vigevani, I., Corsini, D., Comin, S., Fini, A., & Ferrini, F. (2024). Methods to quantify particle air pollution removal by urban vegetation: A review. *Atmospheric Environment: X*, 21(100233), 1-25. <https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2023.100233>
- Wang, M., QinPeiji, M., Huang, D., Jin, X., Chen, J., Dong, D., & Ren, Y. (2024). Atmospheric particulate matter retention capacity of bark and leaves of urban tree species. *Environmental Pollution*, 342(123109), 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.123109>
- Woodruff, T., Grillo, J., & Schoendorf, K. (1997). The Relationship between Selected Causes of Postneonatal Infant Mortality and Particulate Air Pollution in the United States. *Environmental Health Perspectives*, 105(6), 608-612. <https://doi.org/10.1289/ehp.97105608>
- World Bank Group (WBG). (2016). *Publication: The Cost of Air Pollution: Strengthening the Economic Case for Action*. International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank. OKR: <http://hdl.handle.net/10986/25013>
- Yang, J., Chang, Y., & Yan, P. (2015). Ranking the suitability of common urban tree species for controlling PM_{2.5} pollution. *Atmospheric Pollution Research*, 6(2), 267-277. <https://doi.org/10.5094/APR.2015.031>
- Zhang, W., Li, Y., Wang, Q., Zhang, T., Meng, H., Gong, J., & Zhang, Z. (2022a). Particulate Matter and Trace Metal Retention Capacities of Six Tree Species: Implications for Improving Urban Air Quality. *Sustainability*, 14(20), 1-13. <https://doi.org/10.3390/su142013374>
- Zhang, X., Lyu, J., Chen, W., Chen, D., Yan, J., & Yin, S. (2022b). Quantifying the capacity of tree branches for retaining airborne submicron particles. *Environmental Pollution*, 310(119873), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119873>
- Zhao, K., Liu, D., Chen, Y., Feng, J., He, D., Huang, C., & Wang, Z. (2023). Trait-mediated leaf retention of atmospheric particulate matter in fourteen tree species in southern China. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(1), 33609–33623. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-24638-6>
- Zhiguo , C., Xinyuan, Yahui, Z., Danyang , W., Guangxuan, Y., Yajuan, F., & Benye, X. (2022). Characteristics of airborne particles retained on conifer needles across China in winter and preliminary evaluation of the capacity of trees in haze mitigation. *Science of The Total Environment*, 806(150704), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150704>

Anexos

Anexo 1. Principales centros atractores de la población en la ciudad de Villavicencio

Centro Atractor		Principales motivos de viaje que confluyen en los centros atractores
1	Zona central de la ciudad	Trabajo o asuntos de trabajo, tramite o diligencias, salud, compras, actividades culturales o religiosas, deporte y recreación, estudio
2	Franja de la Carrera 33 desde la Calle 15 hasta Río Ocoa	Trabajo o asuntos de trabajo, tramites o diligencias, compras, estudio
3	Franja oriental de la Avenida 40 entre la Calle 7 y el Anillo Vial, y el sector sur oriental de la intersección del Anillo Vial con la Vía a Acacías	Trabajo o asuntos de trabajo, compras, deporte y recreación, estudio
4	Franja de la Calle 15 desde la Avenida 40 hasta el Anillo Vial	Trabajo o asuntos de trabajo, tramites o diligencias, deporte y recreación
5	Franja de la Calle 35 Avenida Catama, frente al Parque de la Vida Cofrem	Trabajo o asuntos de trabajo, tramite o diligencias, deporte y recreación. salud
6	Sector del cementerio Jardines del Llano y el Bioparque Los Ocarros	Actividades culturales o religiosas, deporte y recreación
7	Franja de ingreso a Ciudad Porfía	Trabajo o asuntos de trabajo, tramites o diligencias, salud, compras, estudio
8	Sector del Parque Las Malocas	Trabajo o asuntos de trabajo, actividades culturales
9	Sector del Morichal	Salud, Estudio

Anexo 2. Valores específicos por semana y día, a partir del modelo SDEM

Valor específico por semana, para cada punto de monitoreo en relación con el PM_{10}

	$\sum_{s=1}^S \frac{\bar{x}_{sw}}{S}$			$\bar{x}_{sw} - \sum_{s=1}^S \frac{\bar{x}_{sw}}{S}$			
Semana	Promedio Marginal	Catumare SISAIRE	Cofrem	Catumare PAMCA	Jordán PAMCA	Sensor Unillanos	Sensor UNAL
1	6,59	9,36	-6,59	-6,59	17,01	-6,59	-6,59
2	5,60	10,84	-5,60	-5,60	11,56	-5,60	-5,60
3	8,41	7,36	-8,41	4,56	13,32	-8,41	-8,41
4	7,12	12,65	-7,12	-2,03	10,74	-7,12	-7,12
5	7,28	11,95	-7,28	-2,36	12,24	-7,28	-7,28
6	6,26	12,24	-6,26	-1,60	8,15	-6,26	-6,26
7	8,00	16,01	-8,00	-0,99	8,99	-8,00	-8,00
8	9,23	-9,23	27,20	-9,23	9,73	-9,23	-9,23
9	7,56	-7,56	15,52	-2,84	9,99	-7,56	-7,56
10	8,00	-8,00	15,76	-1,52	9,75	-8,00	-8,00
11	11,65	8,67	14,36	-3,25	3,52	-11,65	-11,65
12	12,09	24,54	-12,09	0,15	11,59	-12,09	-12,09
13	18,15	8,43	-18,15	20,11	25,92	-18,15	-18,15
14	24,36	5,65	19,97	15,59	7,51	-24,36	-24,36
15	20,09	2,82	21,07	3,38	12,90	-20,09	-20,09
16	10,11	10,21	22,24	-2,12	-10,11	-10,11	-10,11
17	9,94	6,36	25,26	-1,79	-9,94	-9,94	-9,94
18	14,90	12,13	17,30	-5,69	6,06	-14,90	-14,90
19	11,15	4,94	18,03	-4,08	3,42	-11,15	-11,15
20	12,12	5,14	18,03	-5,35	6,41	-12,12	-12,12
21	11,59	3,76	19,20	-2,64	2,86	-11,59	-11,59
22	12,41	3,00	18,86	-4,82	7,79	-12,41	-12,41
23	9,78	-9,78	22,26	-1,17	8,25	-9,78	-9,78
24	10,90	-10,90	18,93	1,33	12,45	-10,90	-10,90
25	13,46	5,12	18,30	-3,68	7,17	-13,46	-13,46
26	12,73	3,02	16,82	-3,56	9,18	-12,73	-12,73

27	7,88	8,12	-7,88	-1,00	15,17	-6,52	-7,88
28	13,67	6,29	-13,67	7,04	16,02	-2,01	-13,67
29	14,83	8,38	-14,83	2,74	21,42	-2,88	-14,83
30	12,93	2,48	-12,93	6,55	16,52	0,31	-12,93
31	12,24	0,40	-12,24	6,41	19,73	-2,06	-12,24
32	5,99	-5,99	-5,99	7,15	16,81	-5,99	-5,99
33	22,55	23,85	-22,55	4,06	15,48	1,70	-22,55
34	17,51	8,76	-17,51	9,35	16,58	0,33	-17,51
35	18,15	1,87	-18,15	10,67	19,98	3,78	-18,15
36	15,96	-15,96	-15,96	14,32	23,98	9,57	-15,96
37	17,72	1,87	-17,72	8,72	21,73	3,13	-17,72
38	18,03	0,57	-18,03	12,68	21,64	1,17	-18,03
39	22,22	5,22	-22,22	26,18	35,26	-22,22	-22,22
40	22,55	-22,55	-22,55	26,82	31,07	9,75	-22,55
41	17,23	-17,23	-17,23	17,85	25,74	8,11	-17,23
42	24,83	-24,83	-24,83	43,81	-1,22	31,89	-24,83
43	18,08	-18,08	-18,08	13,46	-1,19	41,96	-18,08
44	12,45	-12,45	-12,45	-12,45	-12,45	62,25	-12,45
45	1,73	-1,73	-1,73	-1,73	-1,73	8,63	-1,73
46	7,25	-7,25	-7,25	-7,25	-7,25	36,27	-7,25
47	2,88	-2,88	-2,88	-2,88	-2,88	14,39	-2,88
48	2,13	-2,13	-2,13	-2,13	-2,13	10,65	-2,13
49	4,18	-4,18	-4,18	-4,18	-4,18	20,89	-4,18
50	1,66	-1,66	-1,66	-1,66	-1,66	-0,58	7,21
51	1,87	-1,87	-1,87	-1,87	-1,87	-0,88	8,35
52	1,71	-1,71	-1,71	-1,71	-1,71	0,09	6,75
53	1,42	-1,42	-1,42	-1,42	-1,42	-1,42	7,11

Valor específico por día, para cada punto de monitoreo en relación con el PM₁₀

$\sum_{s=1}^S \frac{\bar{x}_{sd}}{S}$		$\bar{x}_{sd} - \sum_{s=1}^S \frac{\bar{x}_{sd}}{S}$					
Día	Promedio Marginal	Catumare SISAIRE	Cofrem	Catumare PAMCA	Jordan PAMCA	Sensor Unillanos	Sensor UNAL
1	21,72	-1,17	9,65	-3,29	4,89	2,77	-12,84
2	21,79	-1,23	9,63	-3,03	4,77	2,69	-12,84
3	21,65	-1,19	8,64	-2,66	5,08	2,83	-12,70
4	21,30	-0,83	8,95	-2,32	5,61	1,04	-12,45
5	21,17	-0,71	8,88	-3,38	5,70	1,52	-12,02
6	21,50	-1,02	8,57	-3,48	5,32	3,00	-12,38
7	21,71	-1,21	8,48	-3,45	4,96	3,86	-12,65

Valor específico por semana, para cada punto de monitoreo en relación con el PM_{2,5}

$\sum_{s=1}^S \frac{\bar{x}_{sw}}{S}$		$\bar{x}_{sw} - \sum_{s=1}^S \frac{\bar{x}_{sw}}{S}$			
Semana	Promedio Marginal	Catumare PAMCA	Jordan PAMCA	Sensor Unillanos	Sensor UNAL
1	2,87	-2,87	8,60	-2,87	-2,87
2	1,69	-1,69	8,46	-1,69	-1,69
3	3,00	1,43	10,58	-3,00	-3,00
4	2,04	-0,22	8,36	-2,04	-2,04
5	2,22	-0,51	9,37	-2,22	-2,22
6	1,75	-0,24	7,22	-1,75	-1,75
7	2,31	0,58	8,64	-2,31	-2,31
8	2,13	-1,68	10,18	-2,13	-2,13
9	2,14	-0,64	9,20	-2,14	-2,14
10	2,40	0,50	9,10	-2,40	-2,40
11	2,37	2,12	7,36	-2,37	-2,37
12	3,90	3,46	12,12	-3,90	-3,90
13	10,15	16,73	23,86	-10,15	-10,15
14	8,09	19,45	12,92	-8,09	-8,09

15	7,84	7,96	23,39	-7,84	-7,84
16	0,68	3,41	-0,68	-0,68	-0,68
17	0,71	3,55	-0,71	-0,71	-0,71
18	3,21	1,93	10,90	-3,21	-3,21
19	2,10	1,32	7,10	-2,10	-2,10
20	2,56	0,59	9,65	-2,56	-2,56
21	2,34	2,57	6,81	-2,34	-2,34
22	2,91	0,97	10,66	-2,91	-2,91
23	2,78	1,89	9,24	-2,78	-2,78
24	3,95	3,73	12,06	-3,95	-3,95
25	3,37	2,27	10,49	-2,67	-3,37
26	3,36	1,80	11,64	-3,36	-3,36
27	3,36	-0,13	12,36	-2,16	-3,36
28	7,80	6,88	13,35	3,17	-7,80
29	8,05	3,92	17,57	2,66	-8,05
30	7,80	5,67	13,26	4,47	-7,80
31	7,50	5,22	15,42	1,85	-7,50
32	4,48	3,87	14,03	-4,48	-4,48
33	11,60	7,66	15,58	11,56	-11,60
34	10,17	9,35	14,55	6,59	-10,17
35	11,60	9,72	15,70	9,38	-11,60
36	12,74	9,51	15,93	12,78	-12,74
37	11,33	8,12	17,25	8,64	-11,33
38	11,50	10,62	16,99	6,90	-11,50
39	12,61	22,27	28,16	-12,61	-12,61
40	15,96	19,13	14,65	14,09	-15,96
41	24,90	-0,17	0,01	-2,14	52,10
42	35,86	11,06	5,62	10,74	44,29
43	35,42	8,02	5,04	13,22	44,58
44	18,51	-18,51	-18,51	37,53	36,50
45	8,73	-8,73	-8,73	-4,33	39,27
46	14,75	-14,75	-14,75	14,74	44,25
47	4,36	-4,36	-4,36	21,78	-4,36

48	7,17	-7,17	-7,17	-1,17	29,83
49	11,52	-11,52	-11,52	9,58	36,48
50	4,61	-4,61	-4,61	-3,81	22,25
51	4,47	-4,47	-4,47	-3,53	21,39
52	5,18	-5,18	-5,18	-3,51	24,25
53	4,38	-4,38	-4,38	-4,38	21,91

Valor específico por día, para cada punto de monitoreo en relación con el $PM_{2,5}$

	$\sum_{s=1}^S \frac{\bar{x}_{sd}}{S}$		$\bar{x}_{sd} - \sum_{s=1}^S \frac{\bar{x}_{sd}}{S}$		
Día	Promedio Marginal	Catumare PAMCA	Jordan PAMCA	Sensor Unillanos	Sensor UNAL
1	22,43	-9,89	-2,92	-1,32	14,12
2	23,23	-10,68	-3,49	-4,43	18,60
3	24,21	-11,60	-5,22	-2,89	19,70
4	23,67	-11,12	-4,48	-3,21	18,81
5	22,54	-10,79	-3,32	-0,88	14,99
6	22,02	-10,10	-2,66	-1,14	13,90
7	21,90	-9,81	-2,33	-1,24	13,39

Anexo 3. *Datos mensuales entre los meses de junio de 2022 a 2023**Datos obtenidos para cada punto de monitoreo con respecto al PM_{10} en el período establecido*

Mes	Catumare SISAIRE	Cofrem	Catumare PAMCA	Jordan PAMCA	Sensor Unillanos	Sensor UNAL
Junio	19,18	22,77	12,53	19,65	19,45	11,98
Julio	19,25	26,25	7,68	17,98	19,10	11,61
Agosto	24,21	22,73	15,54	24,97	16,68	9,17
Septiembre	22,42	37,23	19,02	24,26	15,04	7,60
Octubre	18,52	30,09	7,89	18,29	16,36	9,35
Noviembre	19,75	31,60	9,78	20,73	16,63	12,35
Diciembre	19,41	19,76	16,88	31,02	10,64	9,24
Enero	25,86	18,18	23,19	32,22	21,03	7,60
Febrero	19,31	16,76	33,96	44,13	20,27	6,21
Marzo	11,27	16,05	44,17	32,64	44,80	5,52
Abril	18,81	23,59	17,80	22,06	28,55	13,06
Mayo	19,38	24,87	19,05	23,29	14,88	11,96
Junio	17,81	25,33	19,45	23,75	22,21	8,20
Promedio	19,63	24,25	18,99	25,77	20,43	9,53

*Datos obtenidos para cada punto de monitoreo con respecto al
PM_{2.5} en el período establecido*

Mes	Catumare PAMCA	Jordan PAMCA	Sensor Unillanos	Sensor UNAL
Junio	10,07	11,18	21,34	30,66
Julio	4,99	11,37	21,57	30,60
Agosto	9,80	16,81	20,20	29,49
Septiembre	12,28	22,66	20,52	29,41
Octubre	4,07	12,07	21,33	28,02
Noviembre	5,65	14,03	20,29	27,10
Diciembre	11,24	21,98	10,05	25,47
Enero	16,54	23,59	21,46	50,97
Febrero	24,67	31,62	21,31	45,37
Marzo	31,39	32,22	38,81	57,86
Abril	13,30	16,85	23,38	38,45
Mayo	15,14	18,67	13,50	32,77
Junio	16,25	19,85	20,43	25,33
Promedio	13,49	19,45	21,09	34,73

Anexo 4. *Tasas de incremento de casos de hospitalización en Villavicencio*

Año	Hospitalización	Tasa de incremento
2016	1213	11,21 %
2017	1349	
2017	1349	-0,82%
2018	1338	
2018	1338	-36,77%
2019	846	
2019	846	79,20%
2020	1516	
Promedio		13,21%

Anexo 5. *Índices IPC en Colombia desde 2014 hasta 2022*

Año	IPC
2014	6,77%
2015	
2015	5,75%
2016	
2016	4,09%
2017	
2017	3,18%
2018	
2018	3,80%
2019	
2019	1,61%
2020	
2020	5,62%
2021	
2021	13,12%
2022	
Promedio	6%

Anexo 6. *Criterios de clasificación para las especies seleccionadas*

Variables	Criterios de clasificación		
	3	2	1
Hábito de crecimiento	Árbol	Arbusto	Palma
Altura máxima (m)	> 20m	10m - 20m	< 10m
Tasa de crecimiento	Rápido	Medio	Lento
Densidad del follaje	Alta	Media	Baja
Permanencia del follaje	Perennifolia	Semicaducifolia	Caducifolia
Composición foliar	Bipinnadas	Compuesta	Simple
Longitud foliar (cm)	≤ 5 cm	5 cm - 20 cm	> 20 cm
Forma foliar	Palmeado lobulada	Lineal	Elíptica
Superficie foliar	Pubescente, membranosa, tomentosa, pubescencia rígida	Ligeramente pubescente, áspera, glabra membranosa, polvorienta, coriácea	Glabra, lisa, suave, brillante