



Institución
Universitaria
Reacreditada en Alta Calidad

Estrategias urbanas para la reducción a la exposición de material particulado $PM_{2.5}$ en el sistema de bicicletas públicas en la ciudad de Medellín.

Julián Alonso Gómez Bedoya

Instituto Tecnológico Metropolitano
Facultad de Ciencias Exactas y Aplicadas
Medellín, Colombia

2021

Estrategias urbanas para la reducción a la exposición de material particulado $PM_{2.5}$ en el sistema de bicicletas públicas en la ciudad de Medellín.

Julián Alonso Gómez Bedoya

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Desarrollo Sostenible

Director (a):

Ph.D Luis Alejandro Builes Jaramillo

Línea de Investigación:

Prevención y corrección de factores medio ambientales que afecten la salud humana

Instituto Tecnológico Metropolitano

Facultad de Ciencias Exactas y Aplicadas

Medellín, Colombia

Año 2021

A mis padres y Abuelos

“Cuando caminar o andar en bicicleta son parte de la rutina diaria, tanto la calidad de la vida urbana como el bienestar del individuo aumentan”

Jan Gehl -Cities for people

Agradecimientos

A mi asesor Alejandro Builes Jaramillo, por las ideas, confianza y apoyo necesarios en todas las etapas de este proceso.

A la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia por apoyar la investigación.

A Valeria Fajardo Castaño y Stephania Lopera Uribe, por su compromiso y dedicación en el desarrollo de distintas etapas del proyecto. A los demás estudiantes de pregrado de la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia que realizaron y acompañaron las mediciones de campo.

A mi Esposa Diana Escobar, mi Hija Ana Gómez Escobar, y toda mi familia por su cuidado y apoyo.

A aquellos que ya no están, pero que sin ellos todo esto de alguna manera no habría sido posible, mi Abuela Margarita Velásquez, mi abuelo Martín Gómez y mis padres Samuel Gómez y Ana María Bedoya.

INFORMACIÓN BÁSICA			
Título de la propuesta	Estrategias para la reducción a la exposición de material particulado PM _{2.5} en el sistema de bicicletas públicas en la ciudad de Medellín.		
Enfoque de investigación	Cuantitativo		x
	Cualitativo		
	Mixto		
Tipo de investigación	Descriptivo	x	Correlacional
	Comparativo		
Palabras clave	<i>Polución, Material Particulado, Estrategias Urbanas, Sistema de bicicletas publicas</i>		
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL			
Programa académico	Maestría en Desarrollo Sostenible		
Facultad			
Tipo de Maestría	Profundización		Investigación x
Línea de investigación Ajustar líneas de acuerdo con la Maestría	Metrología Química		
	Metrología Óptica		
	Metrología Biomédica		
	Metrología Legal		
	Calidad Acreditación de Laboratorios		
	Otra: Prevención y corrección de factores medio ambientales que afecten la salud humana		x
Duración (en meses)	24 meses		
PARTICIPANTES PROYECTO (ESTUDIANTE Y TUTORES)			
Nombre	Rol	Entidad	Grupo y línea de investigación
Julián Alonso Gomez Bedoya	Estudiante	Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia	
Luis Alejandro Builes Jaramillo	Director	Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia	
	Tutor/asesor		
ENTIDADES PARTICIPANTES			
Nacional	Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia		
	Instituto Técnico Metropolitano - ITM -		
Internacional			
INFORMACIÓN PRESUPUESTAL			
FUENTE	EFFECTIVO	ESPECIE	
Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia	21.038.179	21.433.945	
TOTAL	21.038.179	21.433.945	

Resumen

La contaminación atmosférica en el Valle de Aburrá es uno de los problemas ambientales más controversiales de los últimos años en Colombia y afecta a la comunidad de los diez municipios en la zona. Gracias a la inversión en infraestructura de ciclorrutas y a la creación de un sistema público de préstamo de bicicletas en la ciudad de Medellín se ha intensificado el uso de este medio de transporte. El uso frecuente del sistema de transporte de bicicletas en Medellín puede aumentar el riesgo de exposición a contaminantes ambientales y eventualmente causar deterioro en la salud de los biciusuarios. Esta investigación estableció una ruta dentro de la infraestructura disponible para las bicicletas públicas compartidas e implementó un protocolo de monitoreo, las medidas se llevaron a cabo con un sensor de bajo costo validado con información de retrodispersión atmosférica, con el fin de evaluar las concentraciones y exposición de los ciclistas a $PM_{2.5}$. Con los resultados de esta investigación se detectaron los puntos críticos y los factores que incrementan las concentraciones de $PM_{2.5}$ en las rutas seleccionadas y se identifican posibles estrategias urbanas que permitan reducir la exposición de los ciclistas a este tipo de contaminantes.

Palabras clave: *Polución, Material Particulado, Estrategias Urbanas, Sistema de bicicletas públicas, Airbeam*

Abstract

Air pollution in the Aburrá Valley is one of the most controversial environmental problems of recent years in Colombia and affects the community of the ten municipalities in the area. In fact, investment in bicycle path infrastructure and the creation of bicycle sharing systems in the city of Medellín has intensified the use of bicycles in the region. The frequent use of bicycles in Medellín becomes a new risk factor for the health of cyclists due to the high levels of pollution. This research designed a route within the infrastructure available for shared public bicycles and implemented sensor-based monitoring protocol in order to evaluate the concentrations and exposure of cyclists to $PM_{2.5}$. Measurements were carried out with a low-cost sensor validated with atmospheric backscattering information. With the results of this research, the critical points and the factors that increase $PM_{2.5}$ concentrations in the selected routes are identified and strategies to reduce the exposure of cyclists to this type of pollutants.

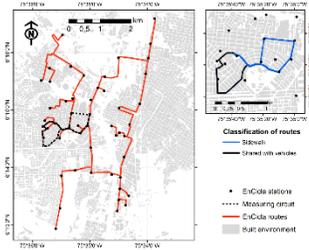
Keywords: *air pollution, bicycle sharing system, air pollution monitoring, particulate matter, urban strategies.*

Graphical Abstract

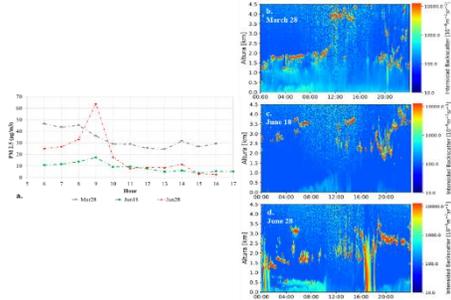
Área de Estudio: Rutas EnCicla

Validación del Sensor

1



2



3

Monitoreo



4

Puntos críticos y Estrategias de mitigación



Contenido

1. INTRODUCCIÓN	16
2. ANTECEDENTES	21
2.1 Nociones de Base	21
2.1.1 Contaminación del Aire	21
2.1.2 Ciclo infraestructura	22
2.1.3 Características Valle de Aburra.	23
2.1.4 Sensores y Monitoreo.	24
2.1.5 Estrategias Urbanas.....	25
2.2 Diagnóstico.....	25
2.2.1 Medellín y sus condiciones físicas.....	25
2.2.2 La Bicicleta, retos en la Región.....	28
2.3 Contexto internacional y nacional	32
2.3.1 La Calidad del Aire	34
2.3.2 Medellín y su deterioro progresivo	35
2.3.3 Los peligros del PM _{2.5} para la salud y especialmente para los ciclistas.	36
2.3.4 Sensores y Monitoreo de Calidad del Aire.....	38
3. FORMULACIÓN	39
3.1 Objetivos	39
3.1.1 Objetivo General	39
3.1.2 Objetivos Específicos.....	39
3.2 Metodología.....	39
3.2.1 El área de estudio	39
3.2.2 Selección de las rutas	41
3.2.3 Selección y Estandarización de Sensores.....	43
3.2.4 Protocolo de Medición.....	43
3.2.5 Evaluación de las mediciones.....	44
3.2.6 Diseño de estrategias urbanas.	46
4. EJECUCIÓN	46
4.1 Validación de Airbeam y AirCasting software.....	47
4.2 Resultados del protocolo de medición	51
4.2.1 Incidencia del tipo de bici carril en concentraciones de PM _{2.5}	51
4.2.2 Puntos críticos "Hotspot".....	52
4.3 Caracterización de los "Hotspot".....	55
4.3.1 Intersecciones Vs Ruta	59
4.4 Contaminación de Fondo	63
4.4.1 Estrategia Escala Ciudad – Comuna	66
4.4.2 Escala Barrio – Personal.....	70
5. CONCLUSIONES	76
5.1 Conclusiones y Recomendaciones	76
5.2 Referencias	78
6. ANEXOS	85

Lista de Figuras

Figura 1 Muertes prematuras por riesgos Ambientales.	16
Figura 2 Tamaño del sistema y préstamo por rango de edad en un día típico.	18
Figura 3 Causas del deterioro progresivo de la calidad de aire en Medellín.	19
Figura 4 Sensor Airbeam y plataforma Aircasting en el sistema operativo Android.	20
Figura 5 Tipo de ciclo infraestructura.	23
Figura 6 Valle Estrecho, Fuente AMVA.	26
Figura 7 Crecimiento Parque Automotor, Fuente AMVA.	26
Figura 8 Fuentes de Emisión PM _{2.5} , Fuente AMVA.	27
Figura 9 Contaminante Crítico, Fuente AMVA.	28
Figura 10 Concentraciones PM 2.5 en rutas de mayor demanda.	31
Figura 12 Seguimiento AMVA al índice de calidad del aire para las 8 estaciones de la red que monitorean PM _{2.5}	36
Figura 15 Circuito de medición.	42
Figura 16 Esquema de medición para el protocolo de monitoreo.	44
Figura 17 Comparación de medidas entre el sensor AirBeam y la estación UNAL SIATA.	48
Figura 18 Comparación entre ciclo por hora de las concentraciones PM _{2.5}	50
Figura 19 Concentraciones medias por hora de PM 2.5 según el tipo de carril en la bici infraestructura.	52
Figura 20 Ciclo diario de concentración media para cada uno de los 13 días medidos. ...	53
Tabla 2 Rutas horarias con concentraciones medias superiores a 25 µg / m ³	55
Figura 21 Tipología de “Hotspot” según entorno construido.	56
Figura 22 Diagramas de caja que representan la distribución de los valores de PM _{2.5} para la ruta completa (naranja) y cada uno de los “hotspots” seleccionados.	59

Figura 23 Intersecciones Vs Ruta. “Hotspots” en condición de cruce, vías arteria y colectoras. Nomenclatura de intersecciones seleccionadas.	60
Figura 24 Concentraciones en intersecciones y ruta de circuito de medición.	62
Figura 25 Concentraciones Promedio estaciones SIATA Medellín, 2019-2021.	65
Figura 26 Delimitación Zona ZUAP, Medellín.	67
Figura 27 Representación esquemática de seis ubicaciones de seguimiento con el tipo de GI y detalles de la carretera.	72
Figura 28 Esquemas de seis conFiguraciones infraestructura verde de carretera.	73
Figura 29 Biofiltros botánicos.	74
Figura 30 Mascara Activa.	76

Lista de tablas

Tabla 1 Desviación media y estándar de los rangos horarios de medición durante cada una de las fechas de medición.....	53
Tabla 2 Rutas horarias con concentraciones medias superiores a 25 $\mu\text{g} / \text{m}^3$	55

Lista de Símbolos y abreviaturas

Abreviaturas

Abreviatura Término

AMVA	Área Metropolitana Valle de Aburra
AirBeam	Monitor de bajo costo que permite medir PM _{2.5} , humedad y temperatura.
BBS	Sistema de bicicletas públicas (Bike Sharing Systems)
BID	Banco Interamericano de Desarrollo
EnCicla	Sistema de Bicicletas Públicas del Área Metropolitana del Valle de Aburrá
IHME	Instituto Para la Métrica y la Evaluación de la Salud (Institute for Health Metrics and Evaluation)
LEZ	Zona de bajas Emisiones (Low Emission Zones)
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos
OMS	Organización Mundial de la Salud
PM	Material particulado
PM _{2.5}	Material particulado con menos de 2.5 micras de diámetro
PM ₁₀	Material particulado con menos de 10 micrones de diámetro
PIGECA	Plan Integral de Gestión de La Calidad del Aire para El Área Metropolitana del Valle de Aburrá.
SITVA	Sistema integrado de transporte del Valle de Aburra
UNICEF	Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia (United Nations International Children's Emergency Fund)
ZUAP	Zona Urbana de Aire Protegido

1.INTRODUCCIÓN

La contaminación del aire representa un importante riesgo medioambiental para la salud, bien sea en los países desarrollados o en los países en desarrollo, tanto que el crecimiento de las emisiones entre el 2008 y 2013 fue de un 8%, generado un incremento del gasto del PIB relacionado a contaminación atmosférica del 0.3% a 1% (OECD, 2016) y pérdidas en hora laborales calculadas en US \$ 225 billones (Fernando Duque, 2017).

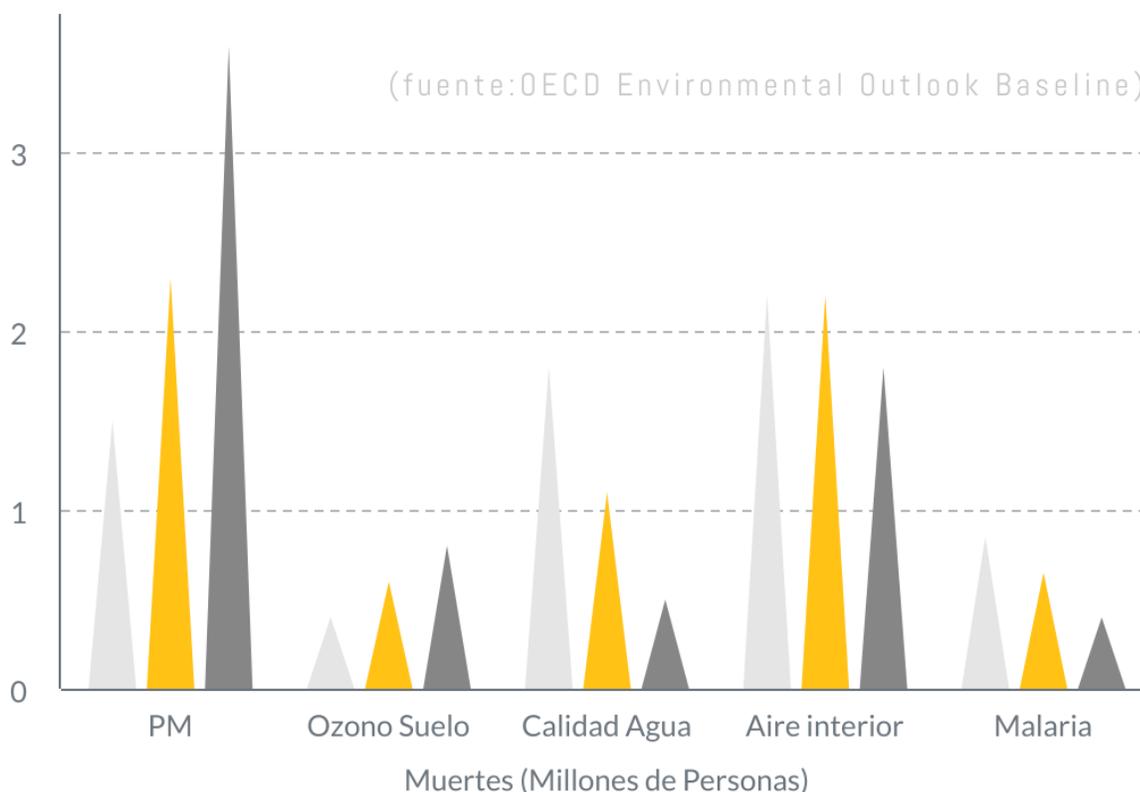


Figura 1 Muertes prematuras por riesgos Ambientales.

De estos contaminantes se resalta como lo muestra la Figura 1 el Materia particulado PM, que se estima que para el 2030 generara más de 3 millones de muertes siendo la principal

causa asociada a riesgos ambientales. El material particulado puede ingresar directamente a los pulmones y al torrente sanguíneo generando una variedad de problemas de salud, como enfermedades cardíacas y otras complicaciones cardiovasculares (OMS, 2017). Este contaminante se nombra y se mide según su tamaño, PM_{10} tamaño inferior o igual a 10 micrómetros y $PM_{2.5}$ tamaño inferior o igual a 2.5 micrómetros o menos. (Área Metropolitana del Valle de Aburrá; Universidad EAFIT, 2020)

Para enfrentar este problema muchas ciudades vienen implementando sistemas de bicicletas públicas compartidas como medio de transporte (BBS), con estos sistemas se pretende reducir el consumo de combustibles fósiles, a la vez que incrementan la actividad física y la reducción del tráfico en las ciudades (Demaio & MetroBike, 2009; Midgley, 2011; Stewart, Anokye, y Pokhrel, 2015). El Área Metropolitana del Valle de Aburra, en donde se encuentra como núcleo el municipio de Medellín, en Colombia, ha planteado como uno de los objetivos relevantes para su desarrollo urbano sostenible el promover la bicicleta como un medio de transporte urbano. Como estrategia para lograr esta meta se puso en marcha el BBS conocido como EnCicla, un sistema que a junio de 2021 contaba con más de 100 mil inscritos, 1.800 bicicletas, 6.987 préstamos diarios en promedio y usuarios en rangos de edad de 16 a 79 años (Figura 2). Los usuarios de estos sistemas al estar en contacto cercano con las fuentes móviles están expuestos a altas concentraciones de contaminantes nocivos para la salud (Bigazzi, Figliozzi, Luo, & Pankow, 2016; Bigazzi & Figliozzi, 2014; Graff et al., 2009), estas condiciones adversas podrían sobrepasar los beneficios que genera la actividad física en la salud (Tainio et al., 2015).

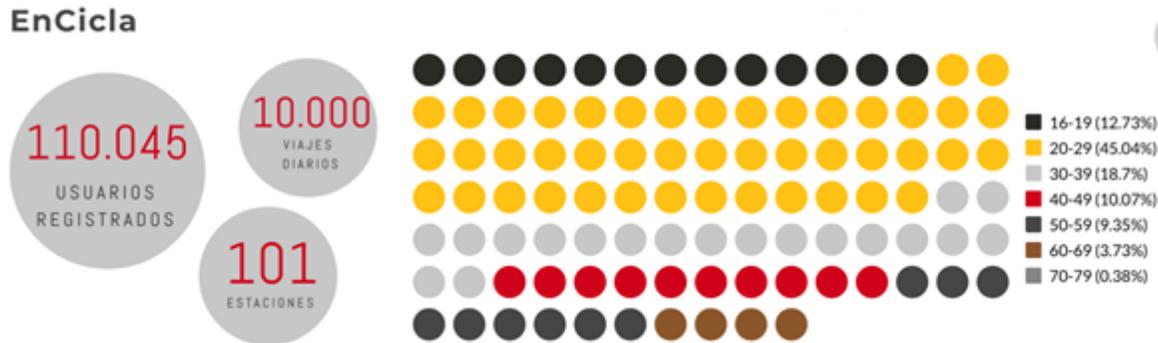


Figura 2 Tamaño del sistema y préstamo por rango de edad en un día típico.

Estas condiciones adversas para los usuarios de los BBS son particularmente importantes en Medellín, una ciudad en la cual la calidad del aire se ve afectada por los factores que se pueden definir como de origen natural y de origen humano (Figura 3). Las de origen natural se refieren a las condiciones físicas del valle de Aburrá, cuenca natural del río que lleva el mismo nombre y atraviesa de sur a norte, rodeado de montañas inclinadas que generan microclimas, ralentizan la velocidad del viento y previenen o minimizan la dispersión de contaminantes (Aguiar-Gil et al., 2020). La segunda, de origen humano, son los contaminantes generados por fuentes móviles, asociadas a la movilidad urbana y fuentes fijas relacionadas con las industrias. Según el Inventario de Emisiones atmosféricas 2015 del valle de Aburra, el 91 % proviene de fuentes móviles como vehículos particulares (Área Metropolitana del Valle de Aburrá; Universidad Pontificia Bolivariana, 2019). Este problema de calidad del aire afecta negativamente la salud de las personas expuestas a altos niveles de contaminación y se asocia a un amplio espectro de enfermedades agudas y crónicas, especialmente cardiovasculares y respiratorias (Badyda et al., 2016). La evidencia hallada en la ciudad va desde mediciones de los niveles de contaminación ambiental en diferentes zonas del área metropolitana hasta su relación con

problemas respiratorios (Gaviria G. et al., 2012). Con la intención de estudiar mejor el problema, la ciudad de Medellín y Área Metropolitana del Valle de Aburrá han desarrollado el Plan Integral de Gestión de La Calidad del Aire (PIGECA), este plan incluye una red de monitoreo que permite conocer y gestionar la calidad del aire (Zona metropolitana del Valle de Aburrá, 2017, www.siata.gov.co).

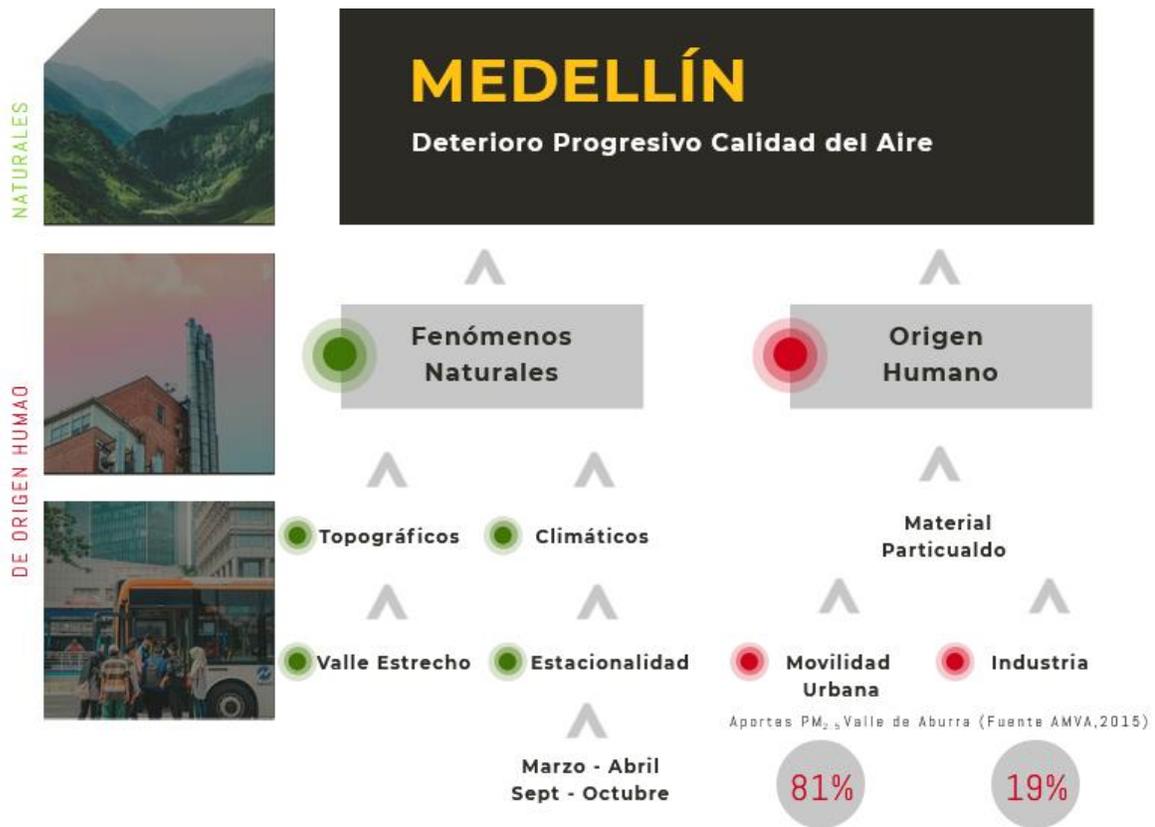


Figura 3 Causas del deterioro progresivo de la calidad de aire en Medellín.

Adicional a este monitoreo de tipo gubernamental, en el mundo se vienen desarrollando sensores de bajo costo, tecnología adecuada para monitorear y analizar concentraciones de contaminación en tiempo real y accesible a los ciudadanos (Gao, Cao, & Seto, 2015). Uno de estos desarrollos es el Airbeam (Figura 04), sensor utilizado en investigaciones participativas ciudadanas para medir concentraciones de $PM_{2.5}$, que en conjunto con su

plataforma Aircasting, permite recopilar, visualizar y compartir datos sobre salud y medio ambiente utilizando un teléfono inteligente, convirtiéndose en una herramienta adecuada para el monitoreo de la contaminación del aire (Ingles, Richardson, & Gar On-Galvis, 2018; Gabrys, 2017; Madelin & duché, 2015; Knight Foundation et al., 2007). La precisión de este dispositivo se probó con tres fuentes de contaminantes diferentes que muestran coeficientes de variación inferiores al 10% en comparación con las medidas realizadas con equipos profesionales (Sousan, Koehler, Hallet, & Peters, 2017).



Figura 4 Sensor Airbeam y plataforma Aircasting en el sistema operativo Android. (Imágenes tomadas de www.habitatmap.org)

La contaminación atmosférica debe ser una cuestión importante para los ciclistas de Medellín y el seguimiento de las concentraciones de los contaminantes en las rutas puede ser un elemento importante para la toma de decisiones en el monitoreo, sistemas de alerta temprana o definir parámetros de diseño en las nuevas ciclorrutas a construir. En esta investigación se presenta una definición para el área de estudio a partir de los datos proporcionados por EnCicla para un día típico y el análisis del ciclo infraestructura a partir de la información planimétrica protocolizada por el POT 2014 de la ciudad de Medellín, la validación del sensor AirBeam, los protocolos de monitorización, la detección de puntos

críticos y estrategias urbanas que se podrían implementar en la ciudad para reducir la exposición a material particulado $PM_{2.5}$.

2. ANTECEDENTES

2.1 Nociones de Base

2.1.1 Contaminación del Aire

La mayoría de los sistemas de monitores de contaminación en exteriores miden dos tipos de material particulado (PM). Según su diámetro en micrones se categorizan en dos tipos PM_{10} (Igual o menor de 10 micrones de diámetro) y $PM_{2.5}$ (Igual o menor de 2.5 micras de diámetro) PM_{10} es aproximadamente una séptima parte del diámetro de un cabello humano. Se compone de sulfato, nitratos, amoníaco, cloruro de sodio y carbono negro. El PM_{10} es perjudicial para la salud porque puede bloquear e inflamar los pasajes nasales y bronquiales, causando una variedad de afecciones relacionadas con las vías respiratorias que conducen a la enfermedad o la muerte (Aguiar-Gil et al., 2020).

El $PM_{2.5}$ es considerado más peligroso para la salud humana debido a su tamaño ultrafino (aproximadamente 1/30 del ancho promedio de un cabello humano). El $PM_{2.5}$ no solo puede penetrar profundamente dentro de los pulmones, sino que también puede ingresar al torrente sanguíneo, causando una variedad de problemas de salud, como enfermedades cardíacas y otras complicaciones cardiovasculares. $PM_{2.5}$ es a menudo el resultado de la combustión de combustibles fósiles de las emisiones de los vehículos, la producción industrial y las centrales eléctricas, así como de fuentes naturales como el polvo arrastrado por el viento y la actividad volcánica (UNICEF 2016).

2.1.2 Ciclo infraestructura

Todo lo que tiene que ver con facilitarle la vida urbana al ciclista a partir de la forma, diseño y ubicación, según el Ministerio de Transporte de Colombia “Ciclo-infraestructura” es un: “Conjunto formado por la infraestructura pensada para la bicicleta y los complementos que la hacen funcional para este vehículo” (Ministerio de Transporte de Colombia, 2016, p.51). Teniendo en cuenta que gran cantidad de los gases contaminantes del aire son emitidos por los sistemas de transporte, y por la condición de compartir la infraestructura vial de la ciudad con automotores. Esta investigación se concentra en los ciclistas y en EnCicla como uno de los modos del Sistema Integrado de Transporte del Valle de Aburrá (SITVA) que sirve para satisfacer los viajes complementarios de última milla y viajes únicos en la zona donde opera. Gracias a su funcionamiento, ha permitido que la bicicleta sea tenida en cuenta en los diferentes instrumentos de planificación y ejecución de proyectos municipales. Este sistema de bicicletas compartidas (BSS por sus siglas en inglés) cuenta con 90 estaciones y más de 80 km de rutas que se dividen según la Figura 5 en tres tipos de carriles: A) segregada en el andén, B) segregada en carril vehicular separadas por elementos verticales y C) no segregadas dónde la bicicleta comparte el carril con el automóvil.



Figura 5 Tipo de ciclo infraestructura. Fuente: Elaboración propia.

2.1.3 Características Valle de Aburrá.

La ciudad de Medellín cuenta con factores naturales que propician la acumulación de contaminantes y la mala calidad del aire para sus habitantes. Se inserta en el Valle de Aburrá, una zona de gran explosión demográfica, con un asentamiento topográfico desfavorable para la dispersión de contaminantes, valle estrecho, encañonado, donde el régimen de vientos sólo permite el desplazamiento de estos con poca dispersión a las capas más altas de la atmósfera; cuenta además con un gran número de asentamientos industriales considerados como fuentes importantes de contaminación y que se encuentran concentrados principalmente a lado y lado del corredor del río Medellín y hacia el sur del valle (Bedoya & Martínez, 2009).

Esta condición de valle estrecho propicia un fenómeno conocido como inversión térmica, esto sucede cuando una capa de aire frío se ubica debajo de una capa de aire caliente, haciendo que los contaminantes no se dispersen, se mantengan y se acumulen cerca del suelo, lo que sumado a una baja velocidad del viento permite que estas condiciones sean

duraderas. La inversión térmica puede retener el ascenso y dispersión de los contaminantes de las capas más bajas de la atmósfera y causar un problema localizado de contaminación del aire. La proximidad de una gran área metropolitana a una cadena de montañas también puede tener un efecto negativo sobre el transporte y la dispersión de contaminantes (Rendón, A. M., Salazar, J. F., Palacio, C. a., & Wirth, V. 2015).

2.1.4 Sensores y Monitoreo.

En el manual de diseño de sistemas de vigilancia de la calidad del aire adoptado por la resolución 650 de 2010, establece 4 grupos de acuerdo con sus características. Estas agrupaciones son: muestreadores pasivos, muestreadores activos, analizadores automáticos y sensores remotos. Algunos de estos métodos como lo evidencian estudios internacionales proporcionan alta resolución temporal pero poca información espacial a un alto precio (> \$USD 15,000 por monitor). Adicionalmente los instrumentos de lectura directa para medir (PM) in situ, oscila entre \$USD 6.000 Y \$USD 15.000, limita su uso masivo. Los fabricantes de equipos están ingresando cada vez más, sensores de bajo costo, que se caracterizan por ser pequeños monitores que permiten conectarse a los teléfonos móviles y medir diferentes contaminantes como ozono, dióxido de carbono y dióxido de nitrógeno (Steven M. Singer, Marc Y. Fink, 2019). Esta democratización de la información permite una mayor investigación participativa generando preguntas de investigación relevantes para las comunidades afectadas que permiten influir en las políticas públicas y beneficiar directamente a las comunidades (English et al,2018).

Uno de estos sensores de bajo costo es el el Airbeam, un dispositivo que está equipado con un sensor de partículas Shinyei PPD60PV (GPSA 14 Ed 2017-SI, 2017) el cual extrae el aire a través de una cámara de detección en la que la luz proviene de una bombilla LED

que dispersa partículas en el flujo de aire. Esta dispersión de luz es grabada por un detector y convertida en una medida que estima el número de partículas en el aire. Estas mediciones se informan una vez por segundo a través de Bluetooth a la aplicación Android de AirCasting (HabitatMap, 2021)

AirCasting es una solución de código abierto de extremo a extremo para recopilar, visualizar y compartir datos sobre salud y medio ambiente utilizando un teléfono inteligente. La plataforma consta de sensores portátiles que detectan cambios en su ambiente y fisiología, incluyendo un monitor de calidad de aire de un tamaño adecuado para llevar en las manos AirBeam. (Knight Foundation et al., 2007).

2.1.5 Estrategias Urbanas

La baja calidad del aire en las ciudades requiere acciones o intervención físicas en las en los lugares o zonas con mayor afectación o altas concentraciones de contaminantes, estos procesos requieren estrategias urbanas. Las estrategias urbanas dirigidas a la reducción a la exposición de PM, en primer lugar, deben establecer una visión hacia el futuro y definir el marco técnico, legislativo, financiero y social dentro del cual se desarrollarán estas acciones concretas. Así mismo, cada estrategia debe aportar argumentos para la gestión y situar a la ciudad en un contexto más amplio (territorial y político), permitiendo extrapolar estas operaciones a otros lugares (Sauer, 2014).

2.2 Diagnóstico

2.2.1 Medellín y sus condiciones físicas.

El Valle de Aburrá y Medellín a la condición de valle estrecho como puede observar en la figura 6 también se ha sumado la afectación por procesos relacionados a el transporte de

material particulado desde el Sahara y los incendios forestales en la cuenca del río Orinoco (Rodríguez-Gómez et al., 2021).



Figura 6 Valle Estrecho, Fuente AMVA

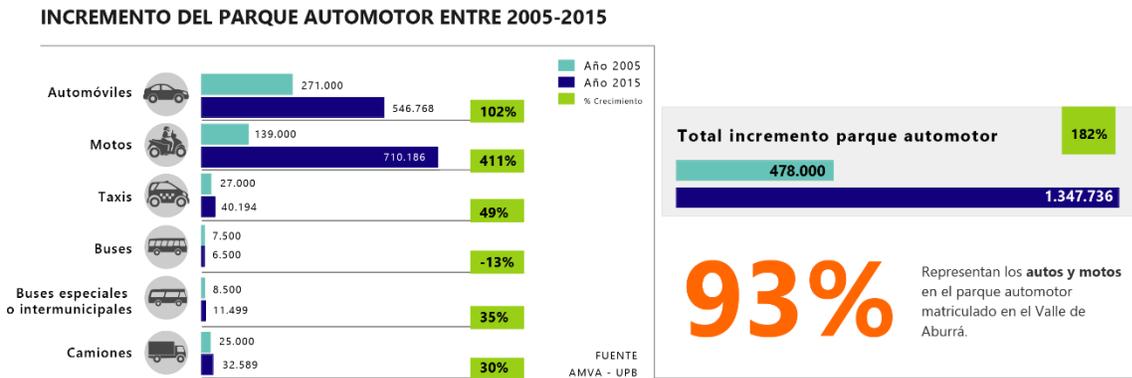


Figura 7 Crecimiento Parque Automotor, Fuente AMVA

Estas afectaciones están asociadas no solo a las actividades industriales, mal manejo de residuos, contaminación por polvo y productos químicos, sino también como se muestra en la Figura 7 al crecimiento del parque automotor que entre los años 2005 a 2015 ha creció en un 93% y para el año 2017 se reportaba un parque automotor de 1.481.328 (Departamento Administrativo de Planeación, 2018). El inventario de emisiones atmosféricas de Valle de Aburrá realizado en el 2015 y actualizado en 2018, identifica como principal cusa de la contaminación del aire en Medellín a las fuentes móviles como observa

en la Figura 8. Los contaminantes críticos en Medellín como se muestra en la Figura 9 se han relacionado a las altas concentraciones de material particulado (PM), que en conjunto con las concentraciones de ozono son causantes de la mala calidad del aire (Área Metropolitana del Valle de Aburrá; Universidad Pontificia Bolivariana, 2019).

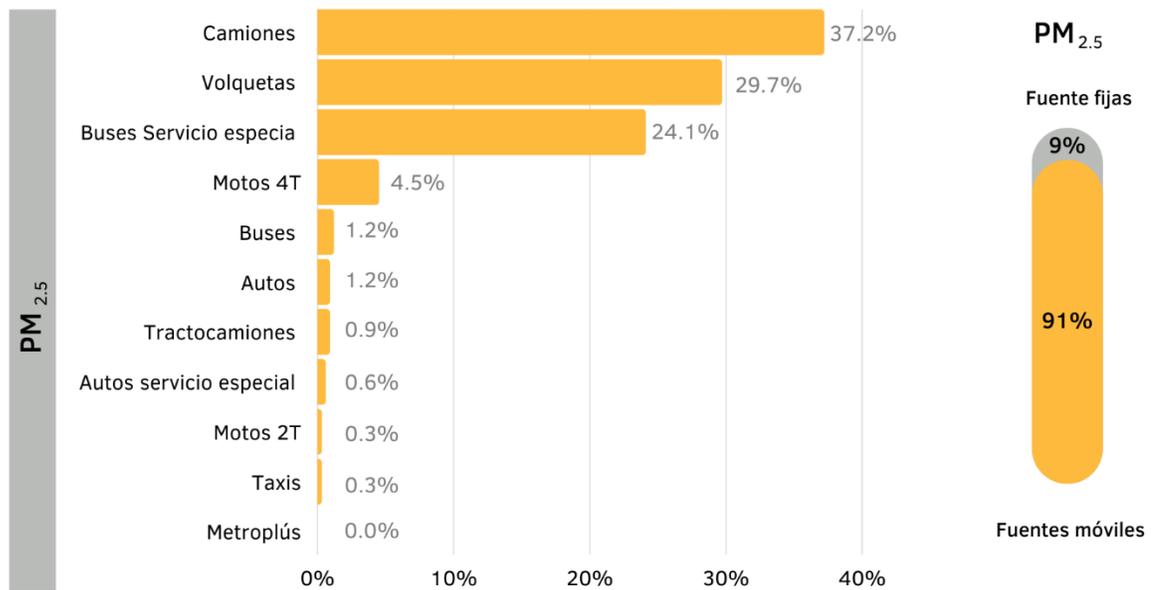


Figura 8 Fuentes de Emisión PM_{2.5}, Fuente Actualización Inventario de Emisiones Atmosféricas, AMVA-2018.

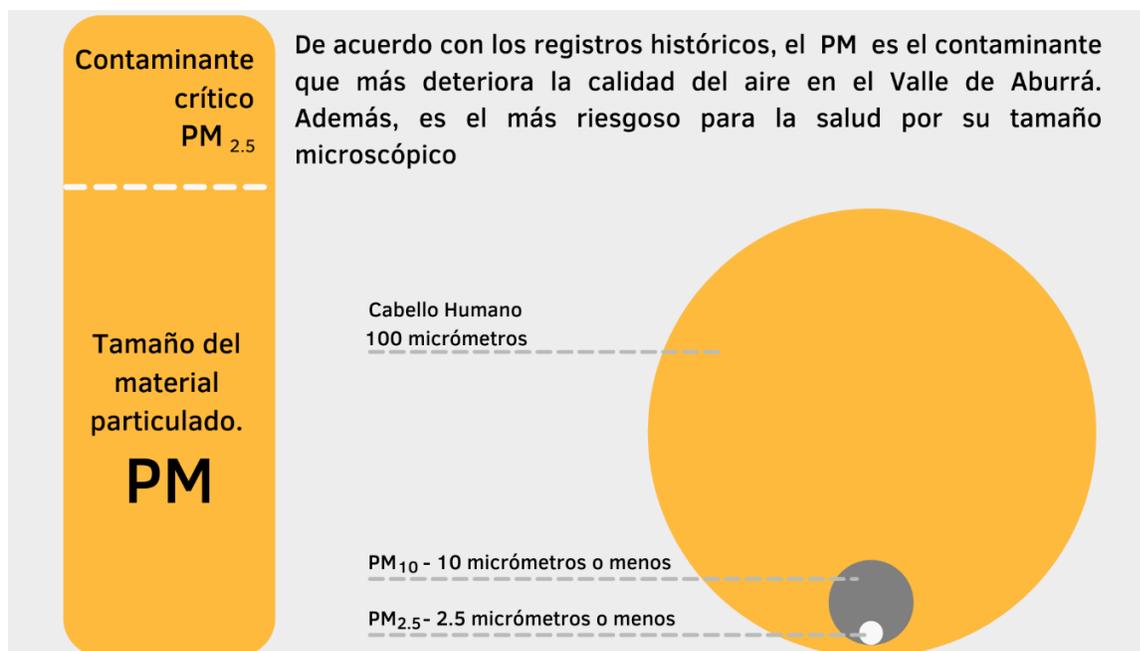


Figura 9 Contaminante Crítico, Fuente AMVA.

Estas condiciones generan que la Organización Mundial de la Salud (OMS), destaque a Medellín como una de las ciudades más contaminadas de América Latina, alcanzando concentraciones promedio de partículas inhalables finas con diámetros de 2.5 micrómetros o más pequeños (PM_{2.5}) de alrededor de 26,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (OMS, 2016). La OMS resalta la incidencia de la contaminación del aire en la mortalidad por enfermedades cardiopulmonares. Por otro lado, el Banco Mundial y el Instituto para la Métrica y la Evaluación de la Salud (IHME) calculan que el costo de las muertes asociadas a la mala calidad del aire le costará a la economía mundial alrededor de US\$225 billones, en pérdidas de horas laborales (Duque, 2017).

2.2.2 La Bicicleta, retos en la Región

El Área Metropolitana del Valle de Aburrá, en Colombia, es una entidad administrativa de derecho público que asocia los 10 municipios del Valle de Aburra del cual Medellín es su

núcleo y que actúa como autoridad de transporte público metropolitano y autoridad ambiental urbana (www.metropol.gov.co), ha incorporado como objetivo el promover la bicicleta como un transporte urbano sostenible en sus políticas de desarrollo urbano. En 2015 esta entidad definió su política pública de bicicletas, que incluye planes concretos para la expansión de la infraestructura de bicicletas, esperando promover la demanda de bicicletas, y proyectando hasta un 10% del total de viajes realizados en la ciudad (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2015). El BSS de la región EnCicla se implementó en 2010 con el propósito de promover la movilidad sostenible. EnCicla comenzó su operación con 6 estaciones y 105 bicicletas y actualmente cuenta con 101 estaciones, incluidas 80 estaciones automáticas, 21 de operación manual y más de 1600 bicicletas (www.encicla.gov.co).

El uso de bicicletas como transporte público ha aumentado en el mundo desde los años 60. Las ciudades de todo el mundo están desarrollando sistemas de bicicletas públicas más accesibles con la intención de mejorar su uso y de este modo aumentar los desplazamientos dentro del sistema y la actividad física. El ciclismo como transporte público tiene muchos beneficios: la reducción del consumo de combustibles fósiles, el aumento de la actividad física y la reducción de la congestión en las ciudades (Demaio y MetroBike, 2009; Midgley, 2011; Stewart, Anokye, & Pokhrel, 2015). Para proporcionar infraestructuras adecuadas para el ciclismo, los gobiernos deben invertir en carriles para bicicletas, estaciones, confort, continuidad de las ciclorrutas y promover la integración del BSS a los esquemas tradicionales de transporte, entre otros. Los formuladores de políticas y los planificadores de la ciudad deben ser conscientes de que este tipo de inversiones deben estar en sintonía con el uso creciente de cada BSS (Cooper, 2010; Mertens et al., 2017; Midgley, 2011).

La selección de la bicicleta como modo de transporte dependerá de factores como la edad del usuario, el género, la seguridad, la infraestructura, los beneficios para la salud del ciclismo y los riesgos para la salud asociados con la calidad del aire en las vías (Buehler, Götschi e Winters, 2016; Mertens, Compernelle, et al., 2016; Mertens, Van Cauwenberg, et al., 2016). Los usuarios de BSS y peatones están expuestos a contaminantes dañinos ya que están en contacto directo con fuentes móviles (Bigazzi, Figliozzi, Luo, & Pankow, 2016; Bigazzi & Figliozzi, 2014; Graff et al., 2009), por lo que podrían perder todos los beneficios para la salud de las actividades al aire libre (Tainio et al., 2015). Las concentraciones de contaminantes en las vías están directamente influenciadas por la congestión vial y las condiciones atmosféricas generales en los alrededores (Hao et al., 2017; Kampa y Castanas, 2008; Peters, Theunis, Van Poppel y Berghmans, 2013), la disponibilidad de información sobre la contaminación en tiempo real, proporcionada por sensores y las aplicaciones de teléfonos inteligentes, pueden influir en la decisión de un usuario frecuente al momento de elegir sacar la bicicleta (Haddad & de Nazelle, 2018; Johansson et al., 2017).

La contaminación del aire es un tema importante para los ciclistas en Medellín, y el monitoreo de contaminantes en la ruta puede ser un factor clave para la toma de decisiones en áreas como el mejoramiento de la infraestructura de ciclismo. Aunque la región ha invertido en la gestión de la contaminación del aire aumentando el número de estaciones de monitoreo en toda el área metropolitana a la vez que se promueven políticas públicas para mejorar el transporte y la calidad de los combustibles fósiles (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2017, www.siata.gov.co) es necesario el desarrollo de sistemas de alerta

temprana o la propuesta de parámetros de diseño o estrategias urbanas que permitan la reducción a la exposición de los contaminantes.

Teniendo en cuenta el panorama descrito, y luego de más de 18 años de la implementación de las ciclorrutas en Medellín y, como fase exploratoria de esta investigación, se identificaron las rutas de mayor demanda (UPB-Estadio, UNAL-SURAMERICANA, UNAL-ROBLEDO y ESTADIO-ORQUIDEAS), a partir de los datos de origen y destino de los viajes proporcionados por EnCicla. Con estos datos y como se evidencia en la Figura 10 se midieron las concentraciones del material particulado PM_{2.5} en las rutas de mayor demanda implementando el uso del AirBeam.

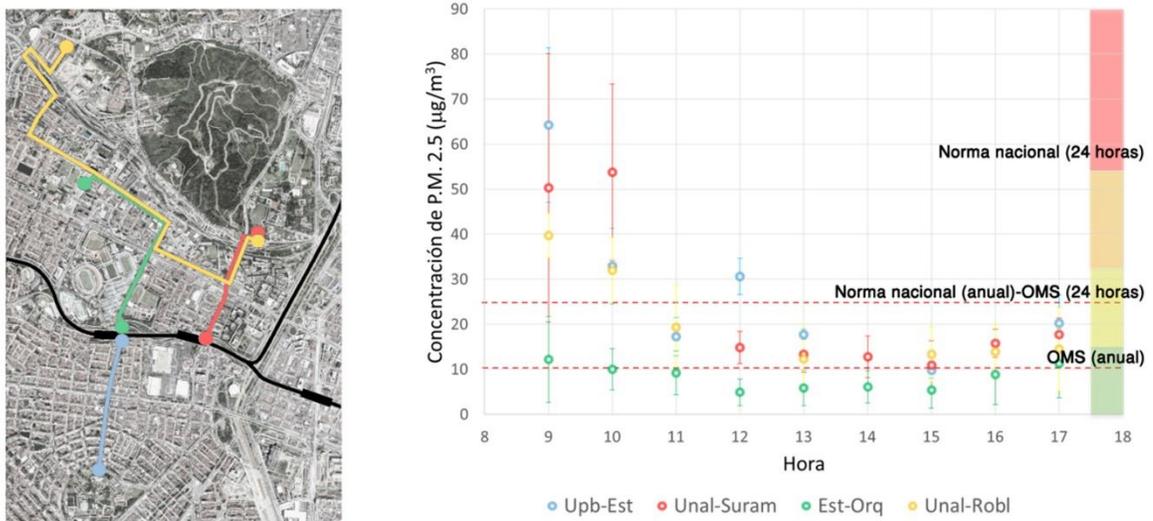


Figura 10 Resultado mediciones de concentraciones PM_{2.5} en rutas de mayor demanda. Fuente: Elaboración propia.

Las mediciones realizadas en las fechas junio 26, Julio, 18, julio 17 del año 2017 en la franja horaria de 9:00 a 17:00 evidencian que en tres de las rutas, UPB-ESTADIO, UNAL-SURAMERICANA y UNAL-ROBLEDO se supera la norma de la Organización Mundial de la Salud (OMS) para toda la franja horaria de medición, reflejando la importancia de

conocer en detalle la exposición a la que están expuestos los usuarios del sistema de bicicletas públicas en la infraestructura dispuesta para su funcionamiento.

2.3 Contexto internacional y nacional

En el mundo cada vez más ciudades le apuestan a la movilidad sostenible y de bajo impacto en las emisiones de contaminantes a la atmósfera y con esta finalidad implementan diferentes tipos de estrategias. Estas estrategias tienen como actor principal la bicicleta por ser un medio altamente eficiente y asequible a un gran porcentaje de la población. Lo más relevante de estas estrategias es que están dando resultados y se pueden encontrar algunas evidencias:

En Sevilla, España se pasó de tener menos del 1% de sus viajes en bicicleta en el año 2000 a 8% en el 2012 gracias a su estrategia ciclo-inclusiva, con la construcción de 120 km de vías para la bicicleta, integración con el transporte público, sistema de bicicletas públicas y campañas educativas (Taddia and Jones 2016). El desarrollo de una red de ciclorrutas a través de calles poco transitadas, la modificación del diseño en las vías para reducir la velocidad a 30 km/h e instalación de más de 65.000 plazas de parqueo para bicicletas han sido algunas de las estrategias que en Londres propiciaron el aumento en el número total de viajes en bicicleta desde el 2000 hasta el 2008 en más de un 99%. En Ámsterdam la participación de viajes en bicicleta aumento de 25% en 1970 a 37% en 2005, Copenhague para el 2006 contaba para el grupo de 40 años o más un incremento del 70% en los viajes en bicicleta en comparación con el año 1995, en Paris se logra pasar del 1% de participación en el 2001 al 2.5% en el 2007; el 47% de ese aumento se generó a partir de la implementación del sistema de bicicletas publicas Velib entre junio y octubre del 2007

(Pucher et al., 2010). En Colombia, cada domingo más de 2 millones de personas participan en la Ciclovía de Bogotá, un programa recreativo que limita la circulación de autos en 121 km de vías, para incentivar el uso de la bicicleta (Taddia and Jones 2016).

Según el banco interamericano de desarrollo (BID), en su guía Ciclo-Inclusión, en América latina y el caribe se evidencia como el crecimiento de la bicicleta como transporte urbano ha mejorado significativamente la movilidad y la equidad. Según la guía, como se evidencia en la Figura 11, en la región se encuentran varias ciudades con cientos de kilómetros de infraestructura y buenos servicios complementarios para la bicicleta.

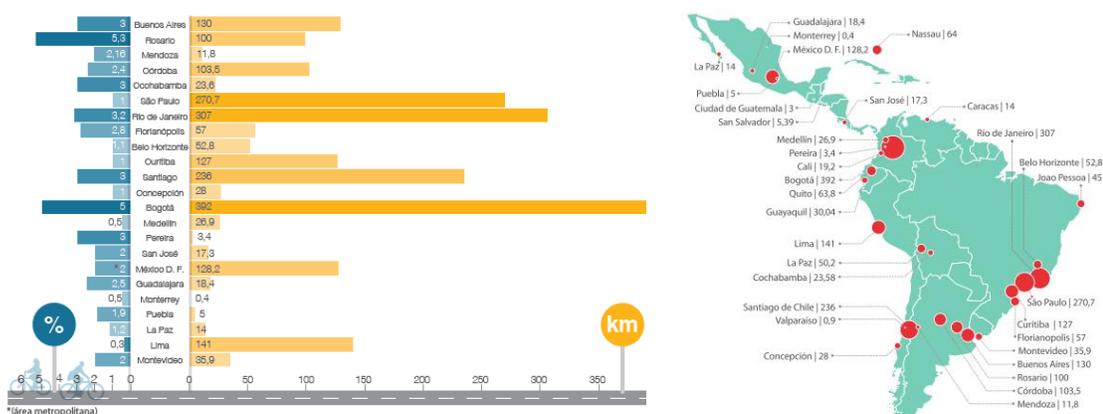


Figura 11 Infraestructura para ciclistas en Latinoamérica y el Caribe. Tomado de (Taddia, A., y otros, 2016)

En la ciudad de Medellín el plan estratégico da la bicicleta elaborado por la secretaria de transportes y tránsito en el año 2011 y donde se mencionan todos los planes propuestos hasta este año para el uso de la bicicleta se encuentra que entre el 2001 y 2002 se diseñaron 100 km de ciclo rutas para la ciudad y que para él años 2003 se había construido el primer corredor de 4,2 km, para el 2012 se habían construido en la ciudad 24,8 kilómetros y el Plan de ordenamiento territorial aprobado en año 2014 propone para su vigencia 400 kilómetros adicionales.

En Medellín y el Valle de Aburrá, EnCicla como parte del Sistema Integrado de Transporte del Valle de Aburrá (SITVA) ha permitido realizar viajes complementarios de última milla, propiciando que la bicicleta sea tenida en cuenta en los diferentes instrumentos de planificación y ejecución de proyectos municipales (Área Metropolitana del Valle de Aburrá. 2015).

2.3.1 La Calidad del Aire

La contaminación del aire es un grave riesgo para la salud humana, tanto en países desarrollados como en los países en desarrollo. Según estimaciones realizadas en 2016 la mala calidad del aire en las ciudades y zonas rurales provoca cada año 4.2 millones de muertes prematuras, esta mortalidad se debe a la exposición a material particulado de PM_{2.5} micrones o menos de diámetro PM_{2.5} (“OMS | Calidad del aire ambiente (exterior) y salud,” 2017), la exposición a altos niveles de contaminación se asocia con un amplio espectro de enfermedades agudas y crónicas, especialmente enfermedades respiratorias y cardiovasculares (Badyda et al., 2016). El costo global por exposición ambiental a PM_{2.5} fue de \$USD 5.7 billones en 2016, equivalente al 4.8 por ciento del PIB mundial (World Bank, 2020).

Para América Latina algunas estimaciones indican que el costo en los efectos en la salud puede representar 1.5% y 3% dependiendo del país (CLEAN AIR INSTITUTE, 2017). Con relación a la media anual de PM_{2.5}, la Organización Mundial de la Salud (OMS), en 2016 analizó en áreas urbanas datos de mediciones satelitales, modelos de transporte aéreo y estaciones de monitoreo terrestre, identificando los valores más altos en Perú (29.0 µg / m³), seguidos de Bolivia (23.3 µg / m³), Chile (23.1 µg / m³), Colombia (17.2 µg / m³), Venezuela (16.8 µg / m³), Ecuador (15.5 µg / m³), Brasil (11.8 µg / m³) y Argentina (17.7 µg

/ m³), (OMS, 2016a). En el caso de Colombia, las concentraciones anuales de PM_{2.5} superaron en todas las ciudades, excepto Pasto, valores por encima de los 17 µg/ m³ en 2014 (Aguilar-Gil et al., 2020).

2.3.2 Medellín y su deterioro progresivo

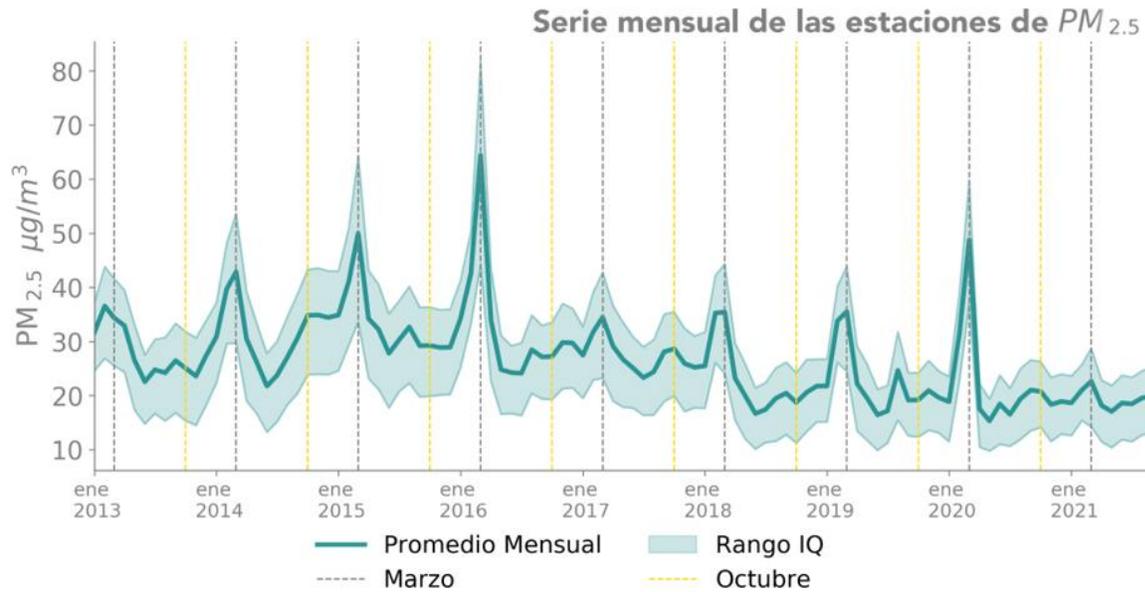
De la misma manera que se localizan ciudades donde la calidad del aire deteriorada es notable, como Los Ángeles, Santiago y Ciudad de México, Medellín se ubica en un estrecho valle llamado “Valle de Aburrá”. Este valle es la cuenca del río Medellín, rodeado de montañas que generan microclimas, ralentizan la velocidad de los vientos y minimizan la dispersión de contaminantes (Murillo-Escobar et al., 2019). Esta configuración topográfica compleja es la que se generan condiciones permanentes de estabilidad atmosférica, y que propicia la suspensión y acumulación de contaminantes (AMVA., 2017). Esta última condición sumada a las altas concentraciones de material particulado (PM) y ozono (O₃) que se vienen registrando históricamente son causantes de la mala calidad del aire (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2020).

En la Figura 12 se muestran las concentraciones del PM_{2.5} reportadas en Medellín en los últimos años, en estos datos se puede evidenciar como se han generado en varias ocasiones como el mes de marzo del 2016, la necesidad de declarar en la ciudad emergencia ambiental por las altas concentraciones medidas en todas las estaciones de monitoreo de la calidad del aire del Valle del Aburra (Escobar, 2016).

PM_{2.5} en el sistema de bicicletas públicas en la ciudad de Medellín.

PM2.5	Marzo															Abril																																
	M8	M9	J10	V11	S12	D13	L14	M15	M16	J17	V18	S19	D20	L21	M22	M23	J24	V25	S26	D27	L28	M29	M30	J31	V1	S2	D3	L4	M5	M6	J7	V8	S9	D10	L11	M12	M13	J14	V15	S16	D17	L18						
Estaciones	DE REPRESENTACIÓN POBLACIONAL																																															
GIR	66	93	99	89	88	81	76	88	96	63	37	48	23	30	38	45	40	60	72	75	72	77	71	47	32	41	46	31	33	40	33	28	20	17	18	26	25	17	30	38	24	19						
SOS - Girardota	70	103	102	95	94	89	90	92	84	76	44	47	27	36	45	52	46	59	69	74	81	84	77	49	51	55	56	49	46	47	45	38	32	26	35	38	39	29	36	43	26	24						
MED	51	74	85	75	79	88	91	82	55	77	34	43	26	29	38	43	36	44	52	59	58	71	59	35	38	46	44	23	27	31	31	26	28	20	21	14	24	24	25	34	20	15						
U. Nacional - El Volador	55	91	93	89	88	82	81	82	72	72	40	42	23	30	38	46	41	45	63	64	66	85	70	36	46	50	47	34	43	44	36	30	27	19	30	28	23	23	30	36	23	20						
Tanques La Ye	60	78	85	76	77	87	76	75	59	67	34	32	23	26	31	42	38	46	53	57	60	79	61	33	37	46	42	26	34	35	31	26	30	21	23	14	18	20	27	38	22	14						
ITA																																																
Casa de Justicia																																																
ITA																																																
I.E. Concejo																																																
CAL																																																
Lasallista																																																
	DE TRÁFICO																																															
MED	72	113	111	104	106	95	104	98	96	88	56	56	32	44	52	46	56	57	74	76	79	90	80	56	56	68	59	50	48	53	48	46	41	30	44	45	42	38	48	53	31	29						
Museo de Antioquia	85	118	117	110	100	96	105	105	95	94	66	60	45	51	61	74	54	51	66	74	83	102	79	60	70	70	58	49	57	57	56	51	51	39	46	45	42	43	54	65	40	44						
EST																																																
Metro																																																

(a)



(b)

Figura 12 (a) Seguimiento AMVA para las 8 estaciones de la red que monitorean PM_{2.5}. Tomado de Informe Anual Aire 2016. Los colores indican el índice de calidad de Aire (ICA) y los datos las concentraciones de PM_{2.5} en µg/m³ (b) Serie mensual de estaciones de PM_{2.5} Fuente AMVA.

2.3.3 Los peligros del PM_{2.5} para la salud y especialmente para los ciclistas.

La OMS ha demostrado que el riesgo de diversas patologías aumenta con la exposición a materia particulado (PM) y hay poca evidencia que plantee un umbral bajo el cual no se

prevería efectos adversos para la salud. De hecho, el rango más bajo de concentraciones que ejercen efectos adversos demostrados no es muy superior a la concentración base, la que se ha estimado en 3-5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en Estados Unidos y Europa Occidental, en el caso de partículas menores de 2.5 micrómetros, $\text{PM}_{2.5}$. La evidencia epidemiológica demuestra efectos adversos de las partículas luego de exposiciones tanto de corto plazo como de largo plazo (OMS 2005). Análisis de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos *OCDE* indican un incremento en el costo económico de la contaminación atmosférica, el cual pasará de ser 0.3% al 1% del PIB para el 2060. Por su parte, el Banco mundial y el Instituto para la Métrica y la Evaluación de la Salud (IHME) estima que las muertes asociadas a la mala calidad del aire le costará a la economía mundial alrededor de US\$225 billones, en pérdidas de horas laborales (Duque, 2017).

En El Área Metropolitana del Valle Aburrá, estudios realizados sobre eventos en salud asociados a la contaminación del aire, evidenciaron en sus resultados que al aumentar las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} , se aumenta el riesgo de contraer enfermedades agudas de tipo respiratorio y circulatorio (UdeA, 2019). Adicionalmente el número de personas que fallecen en Medellín por causa de las enfermedades respiratorias crónicas es cada vez más alto. “Un dato preliminar, revelado por el Área Metropolitana en la presentación del protocolo para atender estos episodios críticos, señaló que el 9,2 % del total de muertes naturales en el Aburrá es atribuible a la contaminación atmosférica” (Gómez, 2021).

Los ciclistas, al movilizarse por la ciudad, se exponen a valores considerables de material particulado fino y hollín (Malaver, 2016). La exposición a las partículas finas durante el uso de la bicicleta puede ser perjudicial a la salud (Peters et al. 2013), se ha encontrado que en situaciones de altas concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ es posible hallar afectaciones a la salud de los ciclistas luego de una hora y media de actividad (Tainio et al. 2015). Por tanto, las

ciclorrutas no se deben construir en calles principales y muy transitadas, sino en vías paralelas y más despejadas (Pankow, Figliozzi, & Bigazzi, 2014). Una mejor comprensión de las interacciones entre la vegetación y los entornos circundantes construidos, podrán determinar los medios para reducir la exposición a la contaminación del aire local utilizando infraestructura verde (Abhijith et al., 2017).

2.3.4 Sensores y Monitoreo de Calidad del Aire.

Los sensores son una tecnología adecuada para monitorear y analizar las concentraciones de contaminación atmosférica demostrando su precisión y practicidad para: la configuración de redes de control de la contaminación atmosférica (Gao, Cao, & seto, 2015), análisis en tiempo real en la ruta mientras se instala dentro vehículos (Hu, fan, Zhang, Chen, & Dai, 2016), y también para medir cuando se instala en bicicletas (Berghmans et al., 2009; Corno, Montanaro, Migliore, & Castrogiovanni, 2017; Elen et al., 2013). En particular, el Airbeam es un sensor que ha estado en el mercado desde el 2014 y ha estado en continuo desarrollo desde su introducción (<http://aircasting.org/>). Se trata de un equipo de bajo costo y fácil de usar, utilizado en la investigación participativa ciudadana que ofrece una herramienta adecuada para el monitoreo de la contaminación del aire (English et al., 2018). La precisión del dispositivo se probó con tres fuentes de contaminantes diferentes que muestran coeficientes de variación inferiores al 10% en comparación con las mediciones realizadas con equipos profesionales de dimensionamiento y análisis de partículas (Sousan, Koehler, Hallett, & Peters, 2017). Además, el sensor tiene un buen rendimiento para ambientes húmedos, por lo que es una buena opción para medir en un entorno tropical húmedo como Medellín (RAI et al., 2017).

3. FORMULACIÓN

3.1 Objetivos

3.1.1 Objetivo General

Proponer estrategias de diseño urbano para la infraestructura de bicicletas públicas en la ciudad de Medellín mediante la identificación de las zonas de riesgo por altas concentraciones de material particulado $PM_{2.5}$, con el fin de aportar acciones de mitigación a la exposición a contaminantes de los ciclistas en las zonas de estudio.

3.1.2 Objetivos Específicos

- Evaluar un sistema de monitoreo de las concentraciones de material particulado $PM_{2.5}$ basado en el uso de Airbeam 2.0 y Aircasting para los tramos seleccionados de las ciclorrutas de Medellín para la estandarización de la determinación de las medidas en tramos estratégicos.
- Caracterizar las concentraciones de $PM_{2.5}$ en los tramos seleccionados del sistema público de bicicletas bajo condiciones meteorológicas secas para identificación de puntos críticos.
- Determinar estrategias para la reducción de la exposición $PM_{2.5}$ en puntos críticos identificados con estudios de casos e información secundaria para beneficio de los usuarios del sistema público de bicicletas EnCicla.

3.2 Metodología

Esta investigación se enmarca en un enfoque cuantitativo y pretende recolectar datos en el área de estudio que permitan a partir de un análisis estadístico establecer patrones de concentraciones en las rutas seleccionadas y generar estrategias que permitan mitigar los patrones identificados. El área de estudio

En la Figura 13 se evidencian las ciclorrutas y estaciones de préstamo y recepción disponibles para el sistema EnCicla, un sistema de bicicletas publicas compartidas que presta servicio a Medellín y al resto de municipios del área Metropolitana del Valle de Aburrá. Con 90 estaciones y más de 80 km de rutas que se divide en tres tipos de carriles: A) segregada en la acera, B) segregada en carril vehicular separadas por elementos verticales y C) no segregadas dónde la bicicleta comparte el carril con el automóvil. Según Figura 14 donde se evidencia la información de origen destino para un día típico del sistema EnCicla hay tres horas pico de uso, en la mañana de 06:00 a 07:00 horas, otra en el mediodía de 10:00 a 14:00 horas y una tercera en la tarde de 16:00 a 17:00 horas.



Figura 13 área de estudio y circuito de medición.

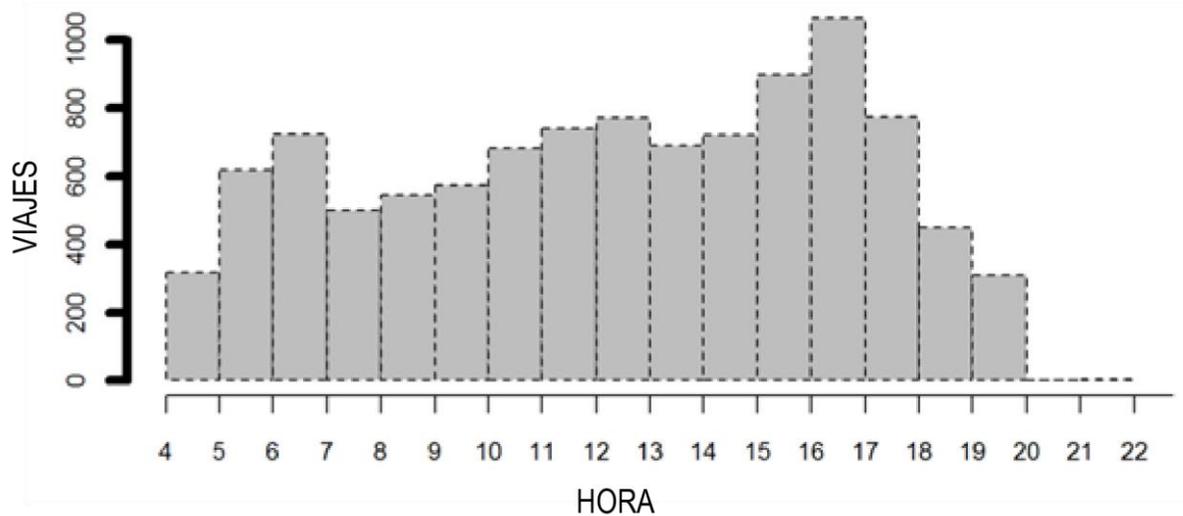


Figura 14 Cantidad de viajes por hora en el sistema EnCicla en un día típico.

3.2.1 Selección de las rutas

Se realizó la selección del circuito de muestreo a partir de los mapas encontrados en el portal open data Medellín (<https://www.medellin.gov.co/geomedellin/>), el circuito se trazó en una porción de ciudad relativamente plana donde la diferencia altitudinal media entre estaciones no es más de 35 m en 2 kilómetros (inclinación < 2%). De esta manera se reduce la influencia de las pendientes en la eficiencia de los vehículos y también se facilita el procedimiento de medición de los ciclistas. El circuito también incluye en su trazado vías de tráfico pesado, tráfico medio y tráfico bajo o residencial.

La cantidad de kilómetros del circuito se establece a partir del análisis visual y planimétrico que permitió identificar 35 km de rutas, segregados en vía (9.5 km), segregada en andén (25.3 km) y sin segregar (0.2 km). Con esta información obtenida se calculó el tamaño de muestra para cada tipo de infraestructura a partir de la siguiente ecuación:

$$n = \frac{N \times Z_a^2 \times p \times q}{d^2 \times (N - 1) + Z_a^2 \times p \times q}$$

Ec. a

En donde, n =tamaño de la muestra, N = tamaño de la población Z = nivel de confianza, p = probabilidad de éxito, o proporción esperada q = probabilidad de fracaso d = precisión (Error máximo admisible en términos de proporción).

Con la información obtenida, se establece un circuito de medición tal como se observa en la Figura 15. Una longitud total de 5.5km donde 0.5 km son de rutas compartidas con vehículos en vías no segregadas para ciclistas, 1.5 km ciclorrutas con segregación en vías y 3.5 km de ciclorrutas con segregación en andén.

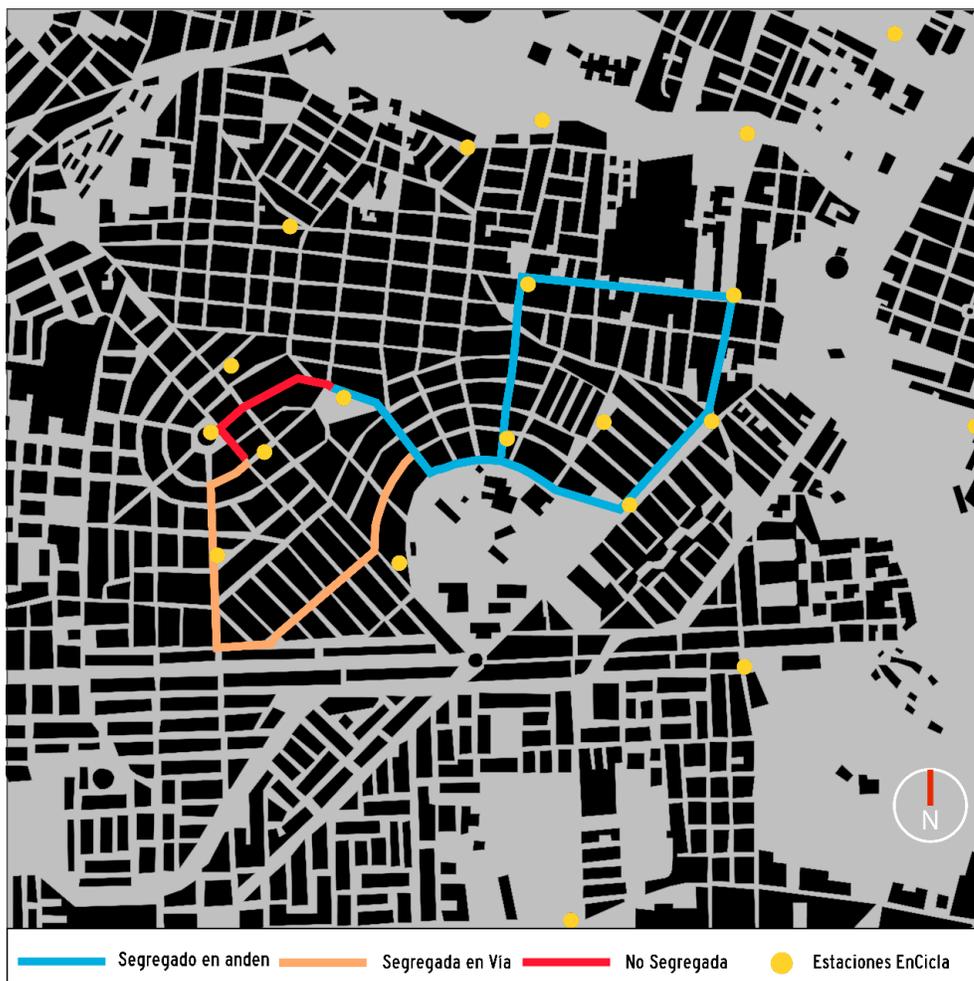


Figura 15 Circuito de medición definido con los criterios de muestreo estratificado y condiciones de pendiente.

3.2.2 Selección y Estandarización de Sensores

Se realizó una estandarización del sensor Airbeam para las condiciones locales según lo recomendado por Sousan et al. (2017). La validación consistió en la comparación de las mediciones del Airbeam con las medidas producidas por los sensores de calidad del aire llamados “nube” instalados por el Sistema de Alerta Temprana se Medellín y el Valle de Aburrá SIATA)(<https://siata.gov.co/>). Estos sensores de bajo costo miden datos cada minuto de temperatura, humedad y PM_{2.5}. La red tiene más de 200 sensores en la región, y cada uno de ellos está calibrado con las estaciones locales de calidad del aire. A los datos de esta red se puede acceder en tiempo real con la aplicación móvil gratuita *ciudadanos científicos* o en www.siata.gov.co. En la segunda etapa de estandarización se comprobaron las mediciones con los datos de retrodispersión producidos por uno de los ceilómetros (Vaisala, 2010) ubicado cerca de la ruta de monitoreo. Los datos de retrodispersión se pueden utilizar como una medición indirecta (proxy) para la concentración de aerosoles y partículas en la atmósfera (Emeis et al., 2008; Wiegner et al., 2014). Por lo tanto, fue posible comprobar el rendimiento general del sensor en respuesta a la presencia de contaminantes en la atmósfera.

3.2.3 Protocolo de Medición.

Las fechas de las mediciones del circuito se definieron según dos criterios: 1) días durante la estación seca, de esta manera la lluvia no interfiere con las mediciones (febrero, junio y julio) 2) días durante la transición seca y húmeda cuando la estabilidad atmosférica aumenta las concentraciones de contaminantes en la región (marzo).

Una medida exitosa consiste en un circuito completo dentro del lapso de una hora a la siguiente (por ejemplo, 06:00 a 07:00) y un monitoreo diario completo comprende 13

medidas de 06:00 a 18:00 horas, este horario incluye las 3 horas pico del sistema EnCicla. El sistema de monitoreo incluyó, como lo muestra la Figura 16: **1)** Airbeam conectado a su aplicación móvil (AirCasting) instalado previamente en un teléfono inteligente la concesión de medidas de PM_{2.5} y GPS coordina cada segundo, **2)** un ciclista que lleva el sensor y el teléfono móvil durante el tránsito en el circuito. Cada monitoreo se llevó a cabo durante las condiciones meteorológicas secas para dos razones: **1)** los usuarios de BSS disminuyen significativamente durante episodios de lluvia y **2)** la precipitación puede alterar drásticamente las concentraciones de PM_{2.5} en la atmósfera.



Figura 16 Esquema de medición para el protocolo de monitoreo. Sensor + Teléfono inteligente + Ciclista en el circuito

3.2.4 Evaluación de las mediciones

Luego de realizar las mediciones en campo con dos sensores Airbeam, fue necesario procesar los datos de concentraciones de PM_{2.5}, hora y coordenadas para cada segundo del recorrido seleccionado; la consistencia de estos datos fue verificada a partir de la información y gráficas obtenidas de ceilómetros del SIATA disponibles en su página web (<https://siata.gov.co>). Con el software R versión 3.6.1 se calculó para cada día el promedio por hora de concentraciones de PM_{2.5} y su desviación estándar. Esto sumado a la

elaboración de un mapa en ArcGIS 10.8 de todas las concentraciones de la ruta en los diferentes días, permitió identificar los puntos críticos o “hotspots”.

Con los “hotspot” localizados, se realizaron recorridos en cada uno, registrando fotográficamente sus condiciones físicas. Para verificar más a fondo la posible incidencia de estos patrones, y la posible incidencia del alto flujo vehicular, se consultó la información del mapa de jerarquización vial protocolizado por el Plan de Ordenamiento Territorial 2014 (POT) aprobado por el acuerdo 48 de 2014 disponible en el portal de la Alcaldía del Municipio de Medellín (www.medellin.gov.co). Esta información se adicionó a el mapa de “hotspot” y permitió identificar las posibles incidencias que se pueden generar en los cruces entre vías arterias y colectoras.

Para incluir toda el área de las intersecciones identificadas se tomó como rango de análisis (buffer) 30 metros de diámetro en ARCGIS tomados desde el centro de cada una de ellas, esta dimensión garantizo la toma datos de todas zonas de las intersecciones con datos. Se promediaron las concentraciones y se obtuvo la desviación estándar, esto permitió comparar todas las intersecciones con la ruta de cada día.

Con el fin de estudiar la influencia de las concentraciones de fondo en la región se evaluó el impacto en la reducción en el tráfico vehicular que se produjo a partir de las restricciones generadas por la llegada y propagación de la enfermedad Covid-19, tomando los datos disponibles de las 10 estaciones ubicadas en el área urbana del municipio de Medellín, disponibles en la página web del SIATA (www.medellin.gov.co), para los meses de abril y marzo de los años 2019, 2020 y 2021. Esta información permitió conocer las concentraciones promedio por hora medidas en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para cada una de las estaciones. De las 10 estaciones se obtuvo el promedio por cada hora del día, los meses y años

seleccionados. Con este procesamiento de los datos se genera una gráfica con las concentraciones de PM_{2.5} en 3 años distintos para los meses marzo y abril.

3.2.5 Diseño de estrategias urbanas.

Para la fase final se consolidó la información obtenida en las fases anteriores y se caracterizó en detalle la ciclo infraestructura. Los resultados obtenidos permitieron realizar una revisión de fuentes documentales en español e inglés, enfocados en la reducción de material particulado en ambiente exterior y su relación con la contaminación del aire, en cualquier ubicación geográfica y que reportaran resultados sobre disminución de concentraciones. La identificación de manuscritos se realizó a través de ScienceDirect y Scopus limitando las consultas hasta el 08 de agosto de 2021. Esta búsqueda permitió identificar nuevas estrategias urbanas aplicables a la ciudad de Medellín y los puntos detectados con mayores concentraciones de material particulado PM_{2.5}. Esta indagación también permitió evaluar los posibles beneficios o dificultades de las estrategias que esta implementado la ciudad para mitigar este tipo de contaminante.

4.EJECUCIÓN

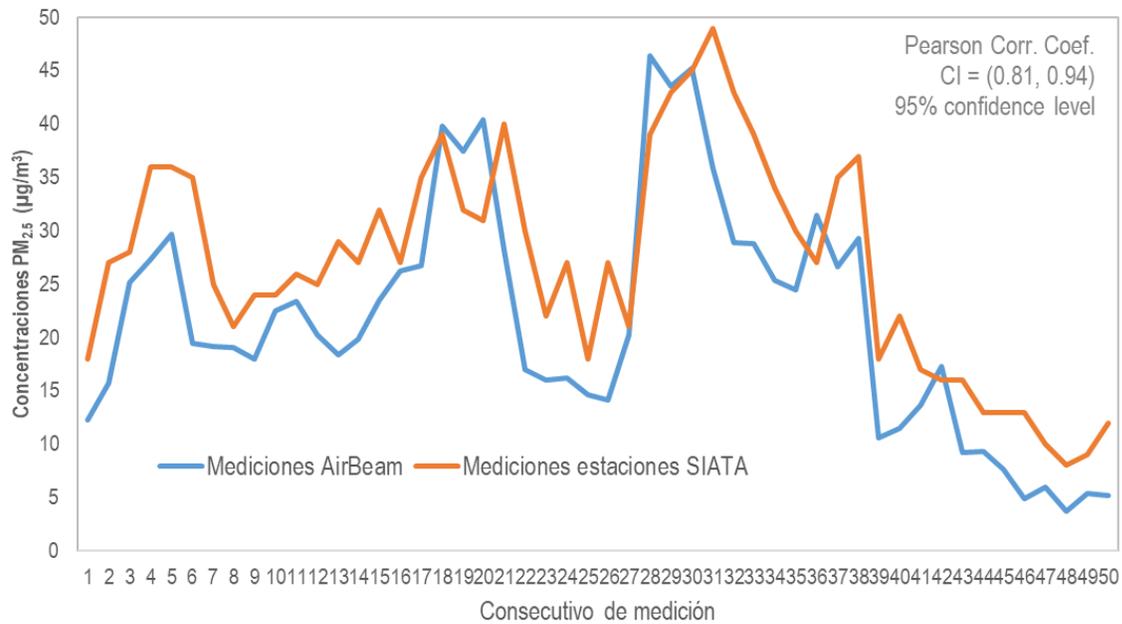
Con el fin de evaluar las concentraciones y exposición de los ciclistas a PM_{2.5} se diseñó un circuito y un protocolo de medición dentro la infraestructura dispuesta para el sistema EnCicla. Durante 13 días y 141 horas se llevaron a cabo las mediciones, con un sensor de bajo costo validado con información de retrodispersión atmosférica. Los puntos críticos “hotspots” se identificaron como las zonas de la ruta en donde las concentraciones superaban tres desviaciones estándar por encima de la media en cada ruta. Se identificaron dos tipos de “hotspot” según la configuración del entorno construido.

Adicionalmente para identificar la incidencia de tráfico vehicular en la generación de estos puntos críticos, se compararon las mediciones en intersecciones del trazado con las concentraciones del resto de la ruta seleccionada.

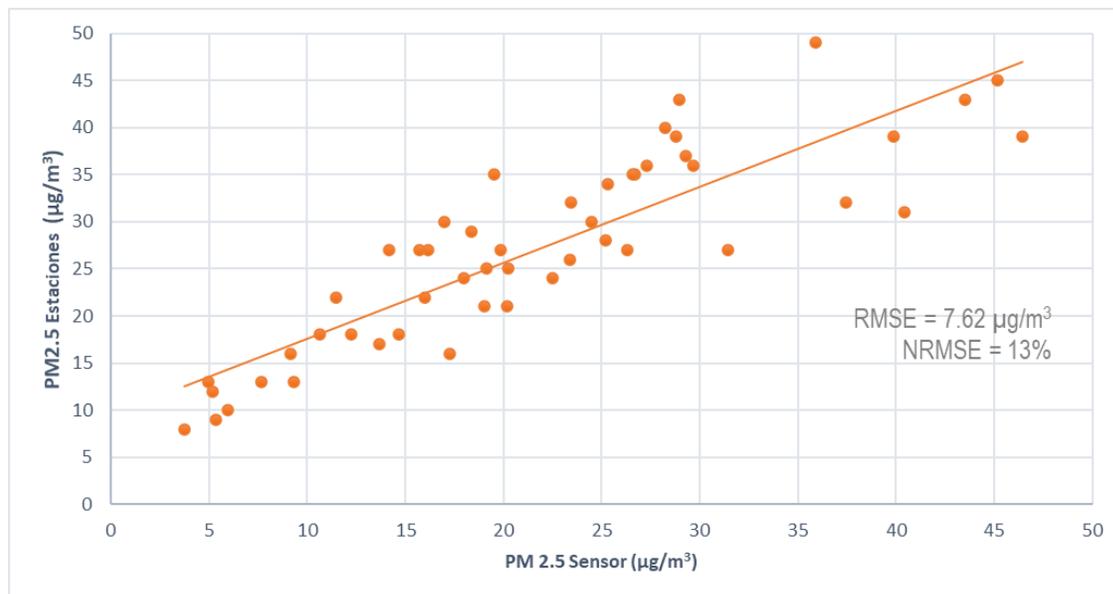
Con los resultados de la fase de mediciones y análisis de datos, se realiza una búsqueda documental para evaluar posibles estrategias que la ciudad podría implementar para la mitigación de las altas concentraciones que estarían afectando a los usuarios del sistema EnCicla.

4.1 Validación de Airbeam y AirCasting software.

Durante 50 horas, se realizaron mediciones cerca de una de las estaciones SIATA (UNAL) en un ambiente exterior no controlado, lo más similar posible a las condiciones que podríamos encontrar midiendo en ruta. Usamos concentraciones promedio por hora del sensor AirBeam y concentraciones promedio por hora reportadas por SIATA (Figura 17). Se encontró un coeficiente de correlación de Pearson en el rango de (0,81 - 0,94) con un 95% de confianza que se puede explicar por las diferencias en las metodologías de medición, debemos recordar que las estaciones cuentan con equipos de medición de bajo volumen y pesaje de filtros y sensores de dispersión de luz. Por otro lado, el sensor tiene un error cuadrático medio (RMSE) de $7,6 \mu\text{g} / \text{m}^3$ y un RMSE normalizado (NRMSE) del 13%. Este primer resultado de la validación muestra que el sensor tiene una representación bastante buena de las concentraciones cerca de la estación, como se encontró recientemente (Kuula et al., 2019) para estudios al aire libre.

PM_{2.5} en el sistema de bicicletas públicas en la ciudad de Medellín.

(a)



(b)

Figura 17 comparación de medidas entre el sensor AirBeam y la estación UNAL SIATA. Serie de tiempo de concentración durante las 50 horas de medición (a), gráfico de dispersión de concentración de estación y sensor (b)

Los ceilómetros son dispositivos laser que obtienen datos de retrodispersión en la atmosfera, los cuales dan cuenta de las concentraciones de partículas en la troposfera en función espacio y tiempo (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2016), es por esta última condición que a partir de los datos obtenidos de la red de ceilómetros SIATA se realiza una comparación entre los circuitos de medición y los perfiles verticales de retrodispersión durante tres días: 28 de marzo, 18 de junio y 28 de junio (Figura 18). En marzo 28, durante la transición de la temporada seca a la temporada húmeda, las concentraciones de $PM_{2.5}$ son superiores a $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ durante la mayor parte del día, especialmente de 06:00 a 10:00, mientras que la retrodispersión muestra nubes alrededor de 1500m por encima de la superficie (rojo) y alta retrodispersión debido a partículas todo el día, pero más intensa de 00:00 a 12:00 horas (Figura 18b). El 18 de junio, concentraciones de $PM_{2.5}$ fueron alrededor de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y el patrón de retrodispersión es caracterizado por nubes superiores a 3000m por encima de la superficie y baja retrodispersión cerca de la superficie (Figura 18c). En junio 28, se identifica un pico de concentraciones $PM_{2.5}$ de $63 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 09:00 horas y aunque el trazado de retrodispersión muestra la intermitencia en las nubes alrededor de 1500 m sobre la superficie, lo que propicia una disipación de los contaminantes, podemos observar altos valores de retrodispersión de 0 a 500 m por encima de la superficie alrededor de 09:00 a 10:00 valores que se reducen abruptamente a las 11:00 (Figura 18c) como se puede apreciar en las mediciones del circuito (Figura 18a).

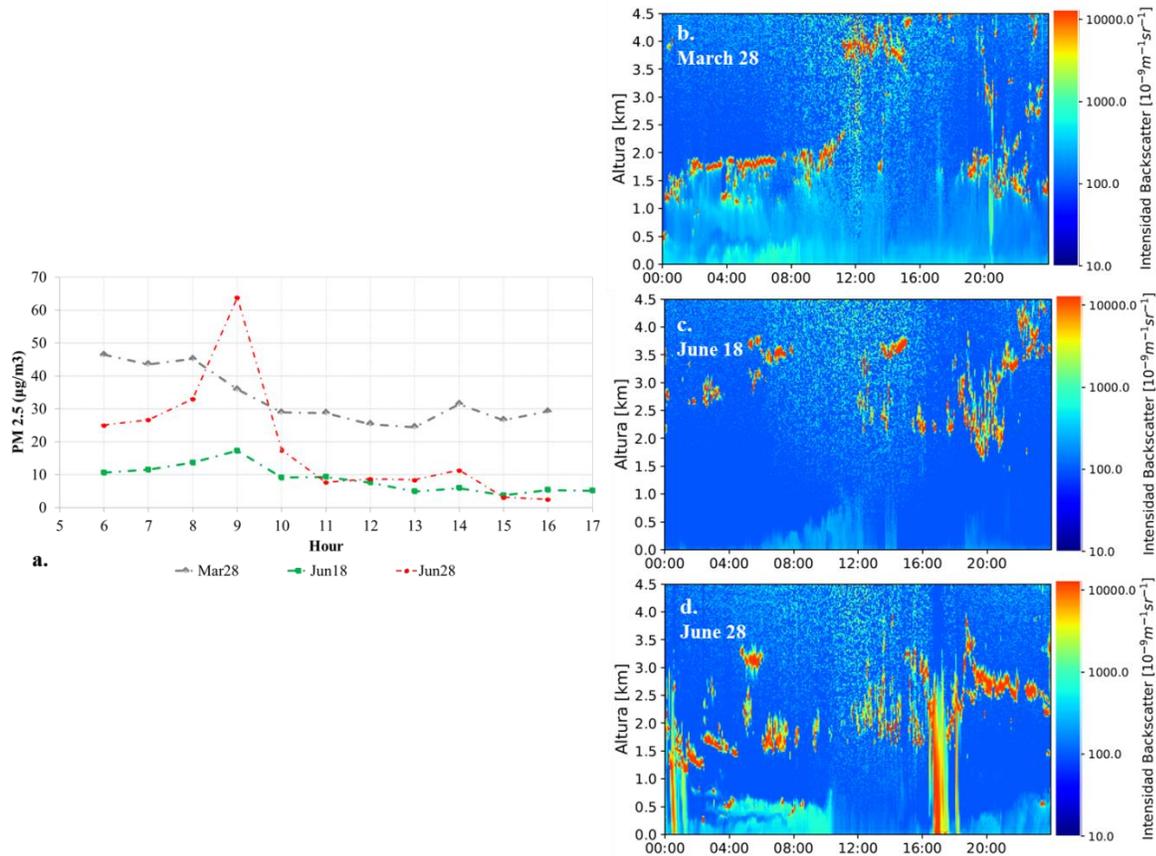
PM_{2.5} en el sistema de bicicletas públicas en la ciudad de Medellín.

Figura 18 Comparación entre ciclo por hora de las concentraciones PM_{2.5} (a) e intensidad en retrodispersión para el 28 de marzo (b), el 18 de junio (c) y el 28 de junio (d). Fuente: mediciones propias y SIATA.

Según lo estudiado por Herrera Mejía (2015) los perfiles verticales de retrodispersión en Medellín durante el mes de marzo se caracterizan por la presencia de nubes en las primeras horas de la mañana que configuran los valles de la capa límite atmosférica, alrededor de 1500 metros sobre la superficie, (color rojo en los trazados de retrodispersión de la Figura 6b y 6d) y la presencia de alta retrodispersión (azul claro en la Figura 6b) por debajo de esta región debido a la concentración de aerosoles en la atmósfera baja, estas nubes empiezan a desaparecer alrededor del mediodía dando a los contaminantes una manera de ascender hacia los niveles más altos de la atmósfera. La condición de un cielo despejado o una atmósfera clara es donde se presenta menos retrodispersión (azul intenso

en la Figura 13b a 13d). De acuerdo con los resultados anteriores se puede validar que el sensor utilizado proporciona medidas in situ coherentes con la dinámica de las concentraciones atmosféricas de aerosoles y partículas en la región (Figura 13a en comparación con la Figura 13b a 13d).

4.2 Resultados del protocolo de medición

4.2.1 Incidencia del tipo de bici carril en concentraciones de $PM_{2.5}$

Con relación al tipo de infraestructura los resultados muestran que la infraestructura no influencia la reducción ni se relaciona con un cambio significativo de la concentración de contaminantes medidos. Las mediciones en ambos tipos de infraestructura están dentro del mismo rango para cada hora del día (Figura 19) y podrían verse influenciados principalmente por condiciones atmosféricas y no por la presencia cercana de los vehículos, algo que se podría esperar para el tipo de infraestructura que comparte el carril con los vehículos.

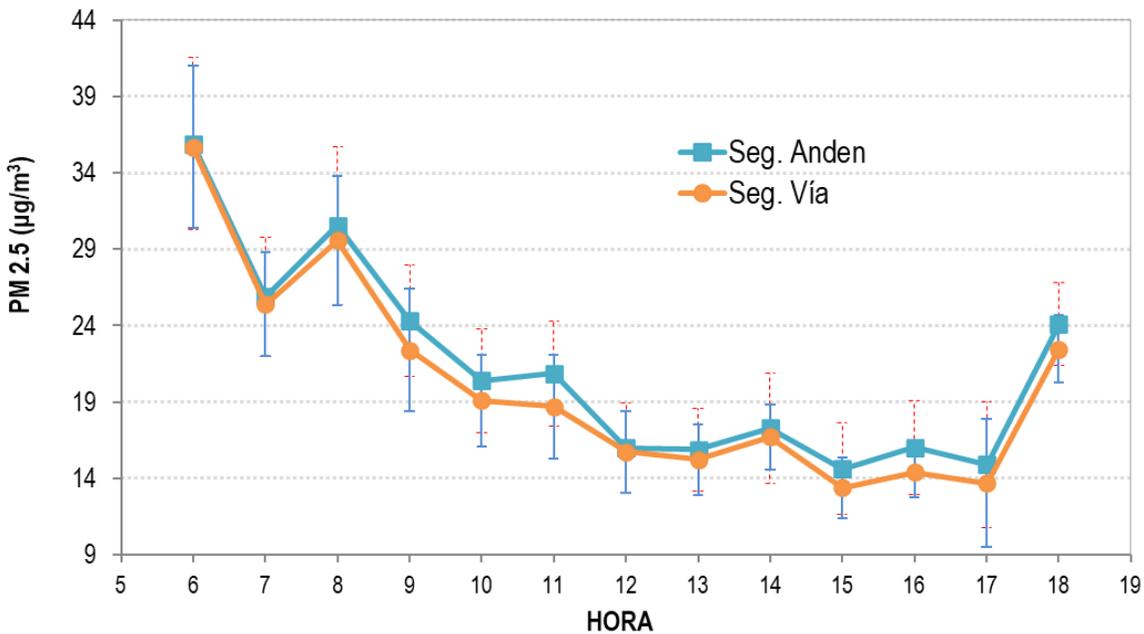
PM_{2.5} en el sistema de bicicletas públicas en la ciudad de Medellín.

Figura 19 Concentraciones medias con sensor Airbeam por hora de PM_{2.5} según el tipo de carril en la bici infraestructura.

4.2.2 Puntos críticos “Hotspot”

Para la detección de los puntos críticos, se tuvieron en cuenta los valores promedio de PM_{2.5} en las horas medidas durante los días de seguimiento presentados en la tabla 1. Los valores para los días supervisados con más de 10 horas continuas de medición en el periodo metrológico de sequía oscilan entre 9,6 y 18,9 µg/m³, mientras que, en marzo, durante la transición de la temporada, las concentraciones se evidencian entre 20 y 33 µg/m³. El ciclo diario de concentraciones muestra que entre 06:00 y 10:00 (región sombreada en la Figura 20), las concentraciones son consistentemente más altas que las de las horas finales del día.

Tabla 1 Desviación media y estándar de los rangos horarios de medición durante cada una de las fechas de medición.

Fecha (DD/MM/AAAA)	Intervalo efectivo por hora de mediciones continuas (horas)	Media PM _{2,5} concentración µg/m ³)	Desviación estándar de PM _{2,5} concentración µg/m ³)
24/01/2018	06:00 – 18:00 (13)	14,40	3,59
17/03/2018	06:00 – 18:00 (13)	21,98	3,25
27/03/2018	06:00 – 17:00 (12)	24,76	4,29
28/03/2018	06:00 – 16:00 (11)	33,26	4,32
18/06/2018	06:00 – 18:00 (13)	8,69	3,04
20/06/2018	06:00 – 17:00 (12)	16,43	4,30
21/06/2018	07:00 – 17:00 (11)	10,51	4,03
22/06/2018	06:00 – 11:00 (6)	17,43	4,70
	13:00 – 17:00 (5)	5,79	3,35
25/06/2018	06:00 – 12:00 (7)	9,87	3,12
	14:00 – 17:00 (4)	3,77	2,55
28/06/2018	06:00 – 16:00 (11)	18,93	6,52
03/07/2018	06:00 – 08:00 (3)	28,23	8,45
04/07/2018	06:00 – 13:00 (8)	15,77	5,02
05/07/2018	06:00 – 17:00 (12)	9,61	3,21

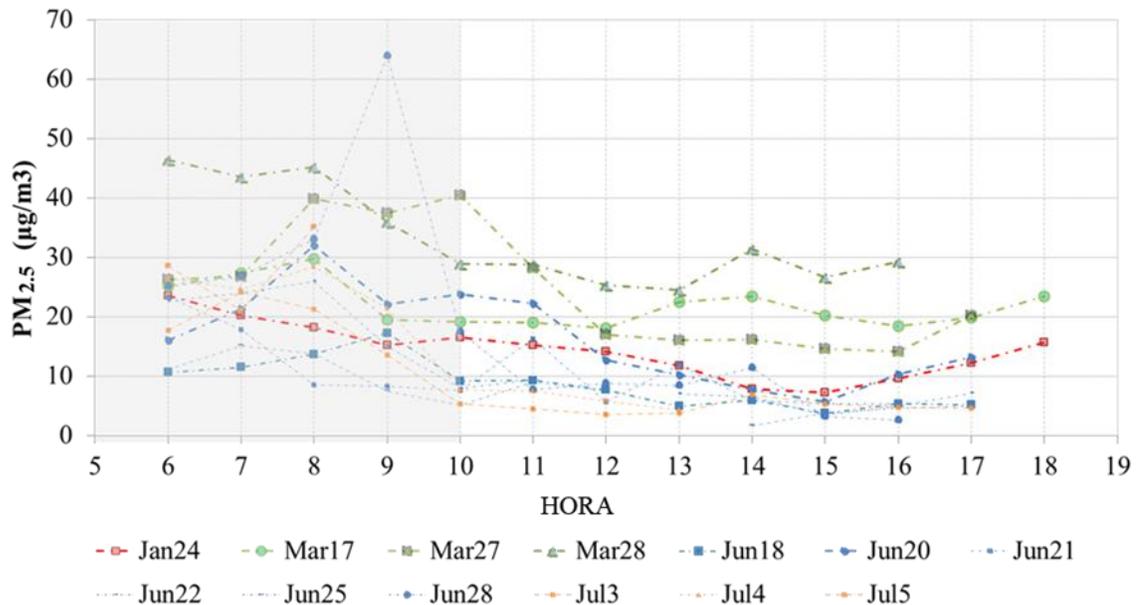


Figura 20 Ciclo diario de concentración media para cada uno de los 13 días medidos.

Con la información obtenida se identificaron 29 condiciones críticas de medición por hora con concentraciones medias de PM_{2,5} por encima de 25 µg / m³ (20% del total de mediciones por hora). La mayoría de los hotspots estuvieron dentro del período de 06:00 a 10:00, excepto el 27 y 28 de marzo, durante la transición meteorológica (seca a húmeda)

PM_{2.5} en el sistema de bicicletas públicas en la ciudad de Medellín.

cuando la estabilidad atmosférica mantiene condiciones desfavorables a la dispersión de contaminantes. No existe una metodología universalmente aceptada para definir y delinear los puntos críticos de contaminación del aire (Goyal et al., 2021), por tanto se establece que las altas concentraciones persistentes en la ruta de aproximadamente tres desviaciones estándar por encima del valor medio se consideran “hotspots”, y en total no alcanzan más del 2,1% de las medidas en las horas seleccionadas; en algunos casos, no hubo valores superiores al umbral para identificar cualquier “hotspot” en el circuito (sombreado en la Figura 20). Después de la identificación teórica de “hotspots”, se procedió con la localización en el mapa de ruta (Figura 21) y en sitio se realizó un registro fotográfico de la configuración física (Material complementario).

Medición día Hora	Media PM _{2.5} concentración en la ruta (µg/m3)	DS de las mediciones en la ruta horaria (µg/m3)	Umbral (Media + 3DS) (µg/m3)	AQI	Porcentaje de medidas encima umbral (%)
Mar17_6	25,2	5,4	41,3	79 *	2,1
Mar17_7	27,3	3,3	37,3	84 *	0,3
Mar17_8	29,7	3,8	41,0	89 *	0,0
Mar27_6	26,3	3,6	37,2	81 *	0,0
Mar27_7	26,7	4,5	40,2	82 *	1,2
Mar27_8	39,9	5,4	56,2	112+	0,2
Mar27_9	37,4	6,3	56,5	106+	0,1
Mar27_10	40,4	4,9	55,1	113+	0,3
Mar27_11	28,2	8,5	53,8	86 *	0,1
Mar28_6	46,4	5,7	63,4	128+	0,2
Mar28_7	43,5	5,5	60,1	121+	0,2
Mar28_8	45,2	6,5	64,8	125+	0,3
Mar28_9	35,9	4,5	49,3	102+	0,0
Mar28_10	28,9	3,7	40,0	87 *	0,5
Mar28_11	28,8	4,0	40,9	87 *	0,1
Mar28_12	25,3	3,3	35,1	79 *	1,5
Mar28_14	31,4	4,0	43,5	93 *	1,6
Mar28_15	26,6	4,2	39,2	82 *	1,0
Mar28_16	29,3	3,2	38,8	88 *	0,9
Jun20_8	32,0	6,6	51,9	94 *	0,1
Jun22_8	25,9	5,2	41,6	81 *	1,3
Jun28_6	25,1	7,3	47,1	79 *	0,0
Jun28_7	26,7	4,4	40,1	82 *	1,4
Jun28_8	33,0	11,8	68,4	96 *	0,0
Jun28_9	63,9	11,2	97,4	155#	0,0
Jul03_7	28,6	9,8	57,9	86 *	0,2
Jul03_9	35,1	13,4	75,3	100 *	0,0
Jul04_6	26,5	5,7	43,5	82 *	2,0
Jul04_8	28,4	4,6	42,2	86 *	0,1

Tabla 2 Rutas horarias con concentraciones medias superiores a 25 µg / m³. Los valores de AQI son adimensionales y se calcularon de acuerdo con (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017); los valores marcados con asteriscos están en el rango 51-100 y clasificados como moderados, los valores marcados con un signo más están en el rango 101-150 y clasificados como nocivos para la salud de grupos sensibles, y los valores marcados con una etiqueta están en el rango 151 -200 y clasificado como nocivo para la salud

4.3 Caracterización de los “Hotspot”

La inspección in situ de los “hotspots” permitió definir dos tipos, de acuerdo con el entorno construido, como se muestre en la Figura 21: **1)** condición de túnel verde y **2)** condición de cruce. La característica principal de un túnel verde es el cierre de la copa de los árboles altos sobre la ruta ciclista. El tipo cruce de vías corresponde a aquellos lugares donde los ciclistas debían esperar más de 2 minutos para atravesar calles principales con alto flujo vehicular. Los factores identificados que influyen en la concentración de contaminantes en esos cruces son que: **1)** se reduce la velocidad promedio de los vehículos para detenerse en semáforos rojos y arrancar después de semáforos verdes; **2)** la cantidad de vehículos que esperan una luz verde aumenta la cantidad de fuentes cerca del ciclista; **3)** las vías principales incluyen mucho tráfico, como autobuses y camiones.

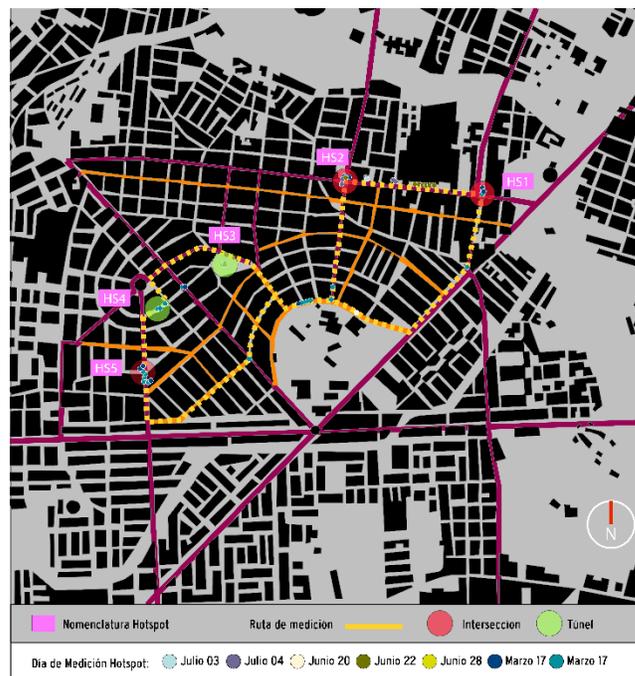


Figura 21 Mapa de ruta e identificación de "hotspots"

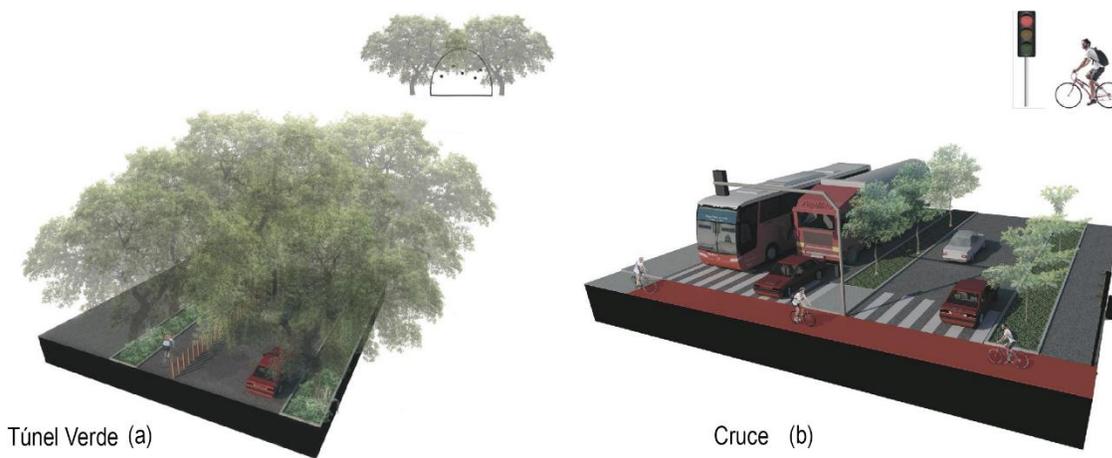
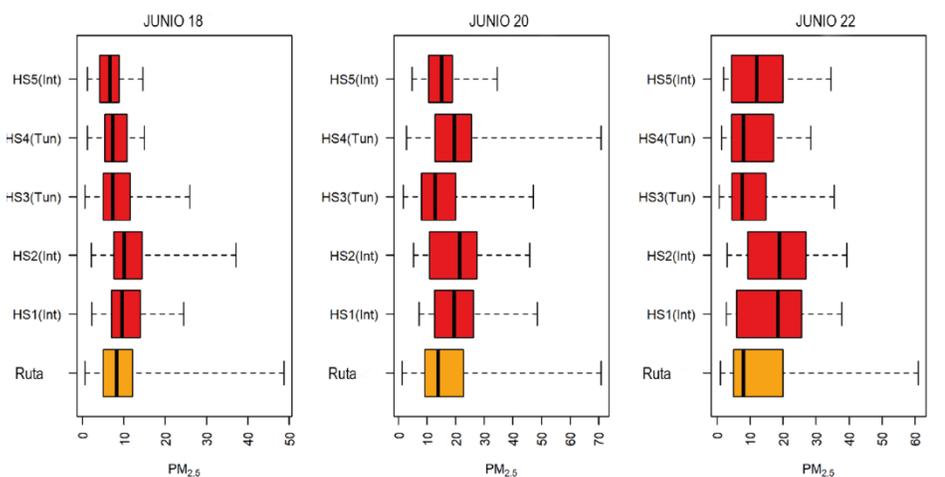


Figura 21 Tipología de "Hotspot" según entorno construido. Fuente, elaboración propia.

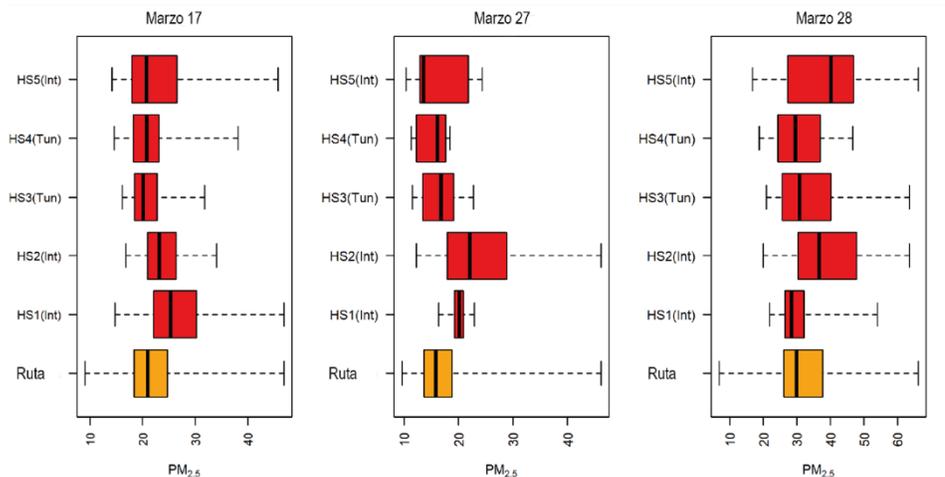
Se seleccionaron 5 áreas (HS1-HS5) que representan condiciones de cruce y condiciones de túneles verde como los puntos críticos detectados (Figura 21). Se compara la distribución de las concentraciones medidas en cada una de las áreas de HS a lo largo de

la ruta durante seis días seleccionados utilizando todas las mediciones horarias disponibles, tres en marzo y tres en junio. Las concentraciones medias en marzo son superiores a las encontradas en otros meses (Tabla 1), estas se pueden ver en los valores medios para las mediciones de ruta completa y áreas HS al comparar la Figura 22a y la Figura 22b. Durante los tres días de marzo, se encuentra que los valores del tercer cuantil de HS2 y HS5 son consistentemente más altos que los de la ruta; podemos observar esto para HS1 para el 17 y 27 de marzo. Los valores medios de HS3 y HS4 son más altos que los valores a lo largo de la ruta para todos los días de marzo, y los terceros cuantiles son más altos que los de la ruta para el 28 de marzo. Este resultado muestra que para marzo se puede observar mayores concentraciones de $PM_{2.5}$ en los “hotspots” seleccionados. Para junio, se encuentra que HS1 y HS2 tienen valores medios y terceros cuantiles más altos en comparación con los valores a lo largo de la ruta. Estos resultados sugieren que para concentraciones de fondo altas como las encontradas en marzo, tanto los túneles verdes como los cruces actúan como “hotspots”, mientras que para concentraciones de fondo más bajas como las de junio, solo las intersecciones presentan las características del “hotspots”. Podemos observar en los ciclos diarios en las áreas HS que las concentraciones durante el día son consistentemente más altas en las intersecciones (HS1, HS2 y HS5) que las medidas a lo largo de la ruta o en los túneles verdes (Figura 22c).

PM_{2.5} en el sistema de bicicletas públicas en la ciudad de Medellín.

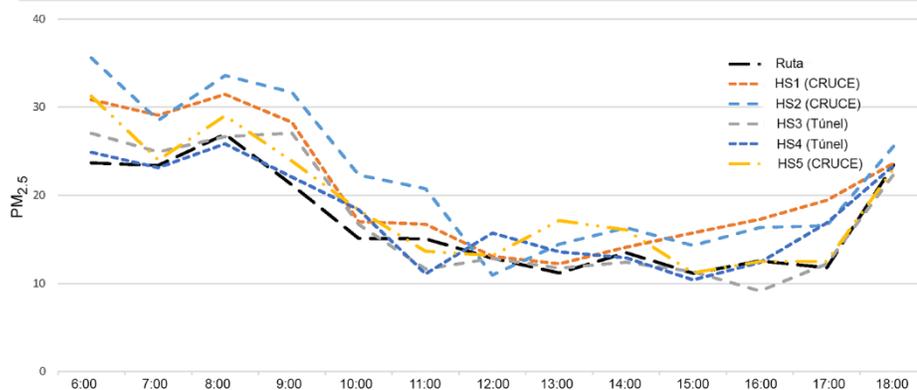


(a)



(b)

MEDICIONES POR HORA VS HS

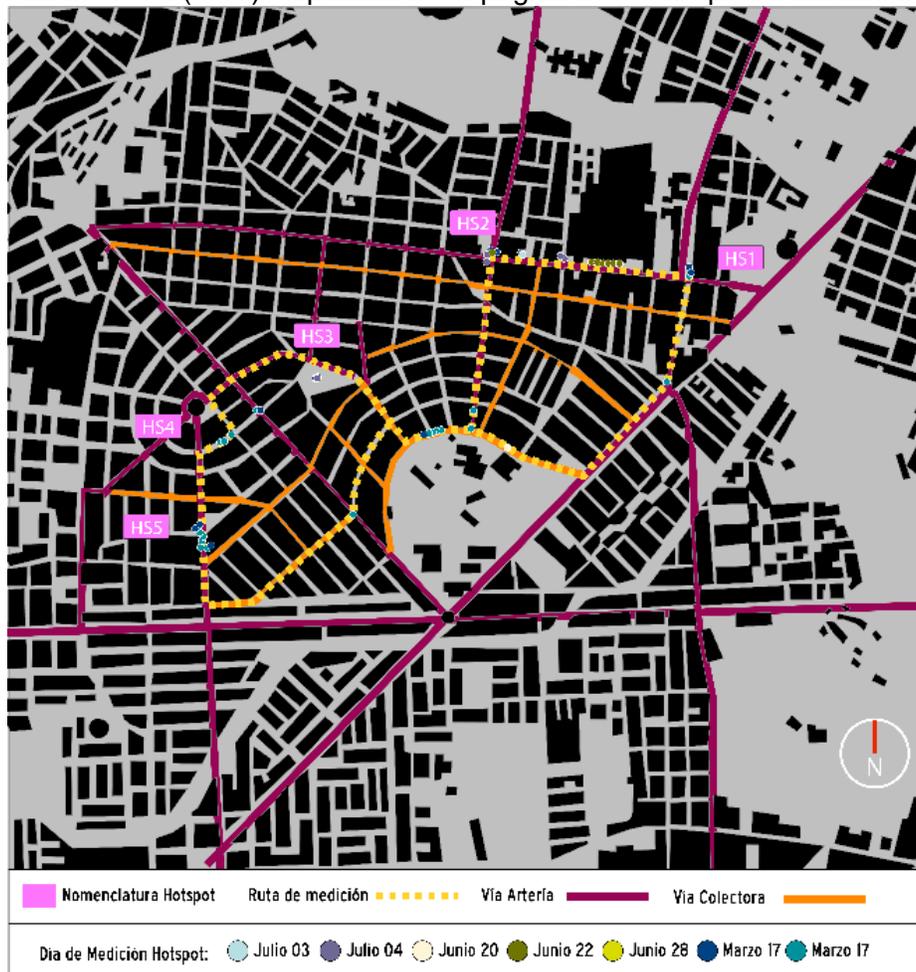


(c)

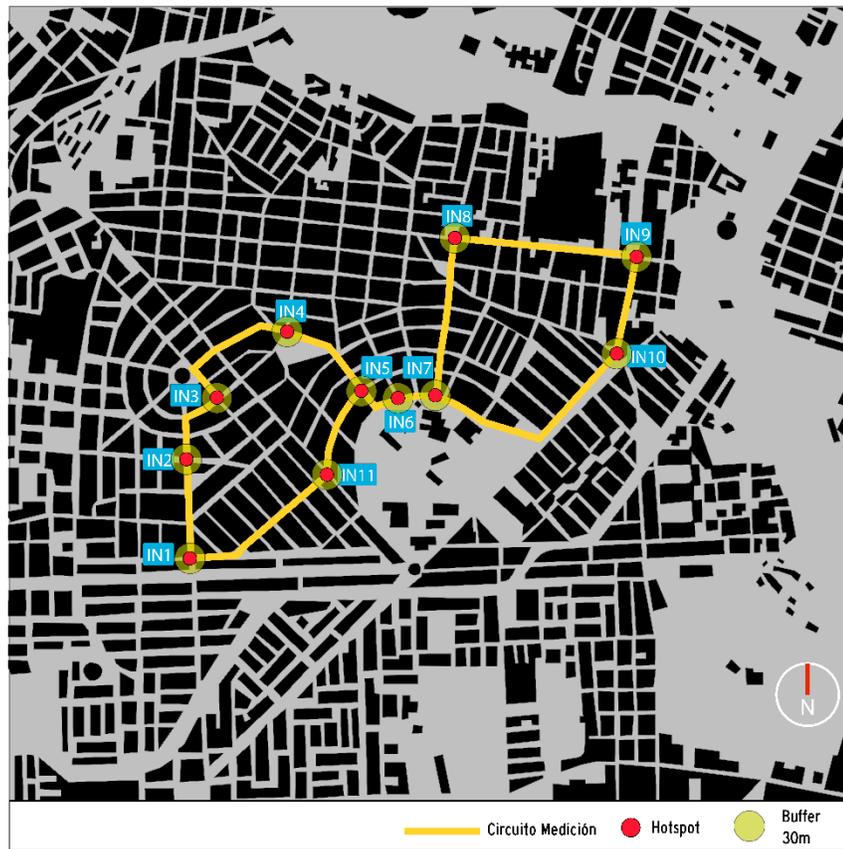
Figura 22 a) y b) Diagramas de caja que representan la distribución de los valores de $PM_{2.5}$ para la ruta completa (naranja) y cada uno de los “hotspots” seleccionados (rojo). **c)** Ciclo diario de las rutas completas comparado con el ciclo diario de los “hotspot”.

4.3.1 Intersecciones Vs Ruta

Con intención de verificar las incidencias de tráfico planteadas en la caracterización de los “hotspots”, se seleccionaron 11 intersecciones y la totalidad de la ruta dentro del circuito (Figura 23b). Estas intersecciones representan los “hotspots” en condición de cruce y las confluencias entre vía arteria y vía colectoras, que por sus condiciones de infraestructura y su jerarquía vial propician mayores flujos vehiculares (Figura 23a). Las tipologías de las vías se identificaron a partir de los planos protocolizados por el acuerdo 48 de 2014 de la ciudad de Medellín (POT) disponible en la página del municipio de Medellín.



(a)



(b)

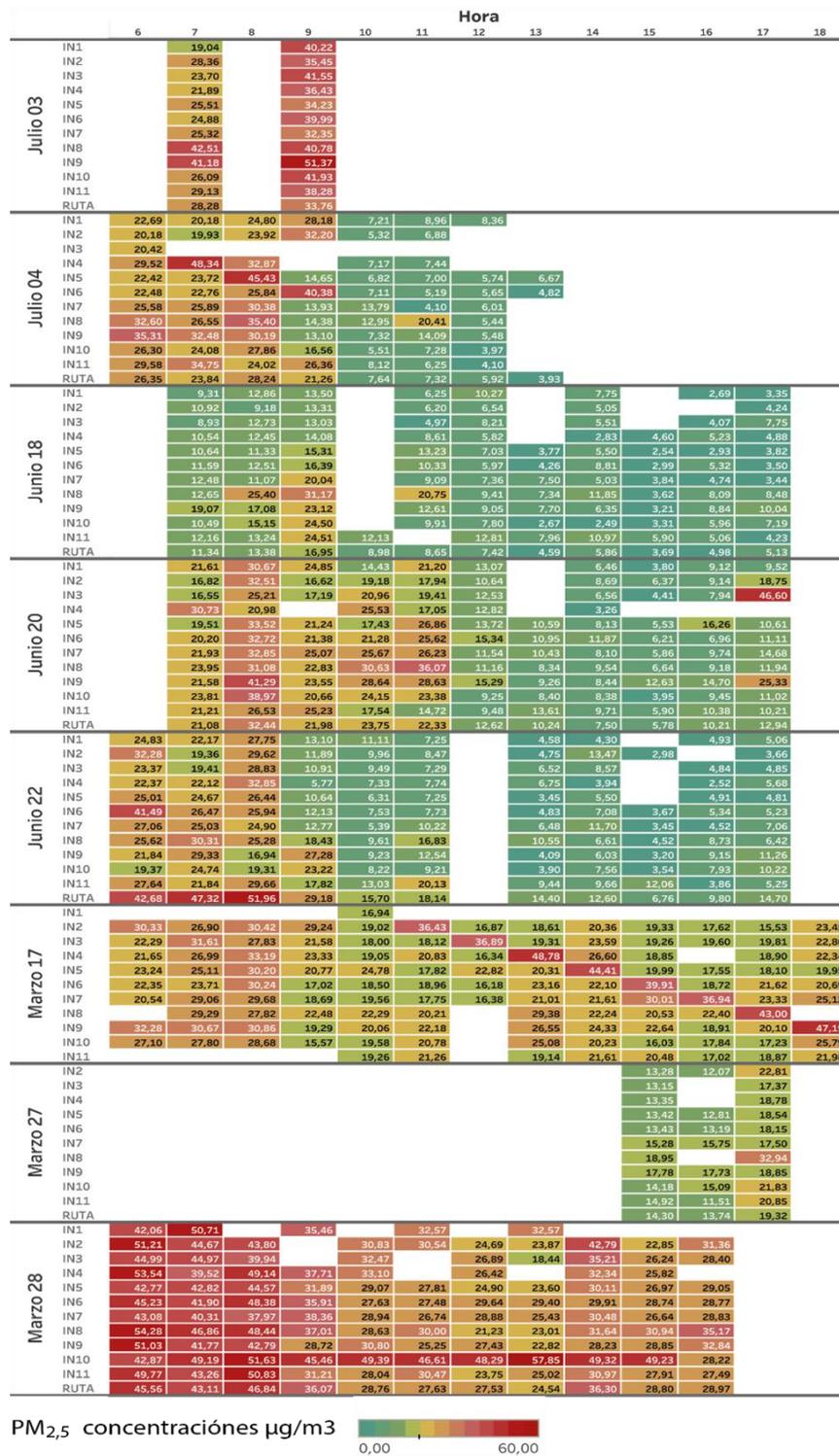
Figura 23 Intersecciones Vs Ruta. (a) “Hotspots” en condición de cruce, vías arteria y colectoras. (b) Nomenclatura de intersecciones seleccionadas.

Se comparan las concentraciones medias en cada una de las 12 intersecciones con las mediciones realizadas a lo largo de toda la ruta durante 8 días seleccionados, utilizando todas las mediciones horarias disponibles, 2 días para el mes de julio, 3 en junio y 3 en marzo. Para generar el promedio y la desviación estándar de cada una de las intersecciones se tomaron todos los datos dentro de rango de 30m de radio (buffer) tomados desde el centro de la confluencia de las vías, con esta dimensión se garantizó tomar los datos de todas las intersecciones y la información por fuera de estos rangos se catalogaron como ruta.

La Figura 24 muestra en columnas las horas establecidas en el protocolo de medición para cada mes y día, en las filas se indican las intersecciones y ruta de medición, las concentraciones promedio de $PM_{2.5}$ se presentan como colores en cada una de las casillas que configuran una combinación hora/zona, los espacios en blanco son horas sin ningún dato de medición.

En esta Figura el 28 de marzo en la IN10 las concentraciones más altas y consistentes durante toda la franja horaria de los días supervisados, la media para cada hora superó los $40 \mu\text{g} / \text{m}^3$ entre las 6:00 y las 16:00. Las concentraciones más altas para IN1- IN11 y en la RUTA se presentan este mismo día y las más bajas se presentan en junio 18 donde la IN8 es el sector con concentraciones máximas $PM_{2.5}$ entre las 8:00 y las 11:00 de $31.17 \mu\text{g} / \text{m}^3$. El 22 de junio la RUTA con concentraciones máximas de $51.96 \mu\text{g} / \text{m}^3$ registra las mayores concentraciones, solo superada a las 11:00 por la IN11 con $20,13 \mu\text{g} / \text{m}^3$ y a la 15:00 con $12,06 \mu\text{g} / \text{m}^3$.

En los días seleccionados las IN1-IN10 como la RUTA del circuito mantienen las concentraciones más altas en la franja horaria comprendida entre las 6:00am y las 9:00 am. Los datos de los días de medición ilustrados no muestran diferencias notables entre IN1-IN7 y las rutas, en los momentos que las concentraciones son altas o bajas se manifiesta la misma tendencia en todas las categorías analizadas indicando que las variaciones pueden estar más relacionadas con las concentraciones de fondo que con las condiciones físicas del entorno construido. Al igual que con el análisis de la incidencia del tipo de bici carril, vemos que la intersección de vías con un alto tráfico tampoco representa un aumento considerable de las concentraciones y se mantiene la dinámica de concentración atmosférica general para cada uno de los días.

PM_{2.5} en el sistema de bicicletas públicas en la ciudad de Medellín.Figura 24 Concentraciones de PM_{2.5} en intersecciones y ruta de circuito de medición.

4.4 Contaminación de Fondo

De la comparación de las intersecciones y ruta se podría establecer que infraestructura vial por donde transita el parque automotor de ciudad no influye de forma determinante en la variación de las concentraciones de $PM_{2.5}$ del sector, y el nivel de exposición de los ciclistas puede deberse a una combinación de los factores que mantienen las concentraciones de fondo en la región, entre las que se pueden contar las fuentes móviles, fijas y otros factores ambientales como la arena transportada desde el desierto del Sahara y los incendios forestales en la región del Orinoco (Rodríguez-Gómez et al., 2021). Tomando una medida de control a la contaminación por fuente móviles, se toman las restricciones a la movilidad establecidas en la resolución 385 del 12 de marzo de 2020 del Ministerio de Salud, por la cual se declaró la emergencia sanitaria por causa de la enfermedad COVID-19, se tomaron los datos de las estaciones de SIATA que miden $PM_{2.5}$ en la ciudad de Medellín para años 2021, 2020, 2019 y los meses marzo y abril, con el fin de evaluar hasta qué punto la concentración de este contaminante en la ciudad se ve realmente afectado en estos meses por la dinámica del transporte.

En la Figura 25 se condensa la información obtenida de las estaciones SIATA, en esta información se puede observar el mes de marzo de 2020 como el periodo de tiempo con mayores concentraciones en comparación con los mismos periodos del 2019 y 2021, esta condición es particular debido a las expectativas que se presentaron con respecto a las posibilidades de una reducción en las concentraciones de contaminantes como resultado a las medidas de cuarentena que restringían el desplazamiento de las personas, disminuyendo el tráfico vehicular según (<https://www.google.com/covid19/mobility/>) en cerca de un 70%.

Esta condición de altas concentraciones de PM_{2.5} se puede explicar, a partir de los eventos de quema de biomasa en marzo y abril en las cuencas del Orinoco y el Valle Magdalena, este fenómeno aumentó la contaminación por PM_{2.5} en casi 20 µg / m³ (Méndez-Espinosa et al., 2020; Arregocés et al., 2021). Las reducciones de PM_{2.5} a largo plazo no cambiaron durante las restricciones flexibles, las cuales permitían una mayor movilidad, esto sugiere que el PM_{2.5} no solo se vio afectado por las emisiones de fuentes móviles como vehículos sino también por fuentes regionales relacionadas a las quemas anteriormente mencionadas. Las estaciones mostraron concentraciones de fondo más altas de PM_{2.5} durante el periodo anterior al cierre en 2020 que el promedio del periodo equivalente en los últimos 5 años, lo que sugiere un aumento en las fuentes regionales (Méndez-Espinosa et al., 2020). Esta situación desvela la necesidad de articular las políticas locales para reducir fuentes de emisión fijas y móviles con estrategias regionales que permitan gestionar adecuadamente los de eventos que aumentan las concentraciones.

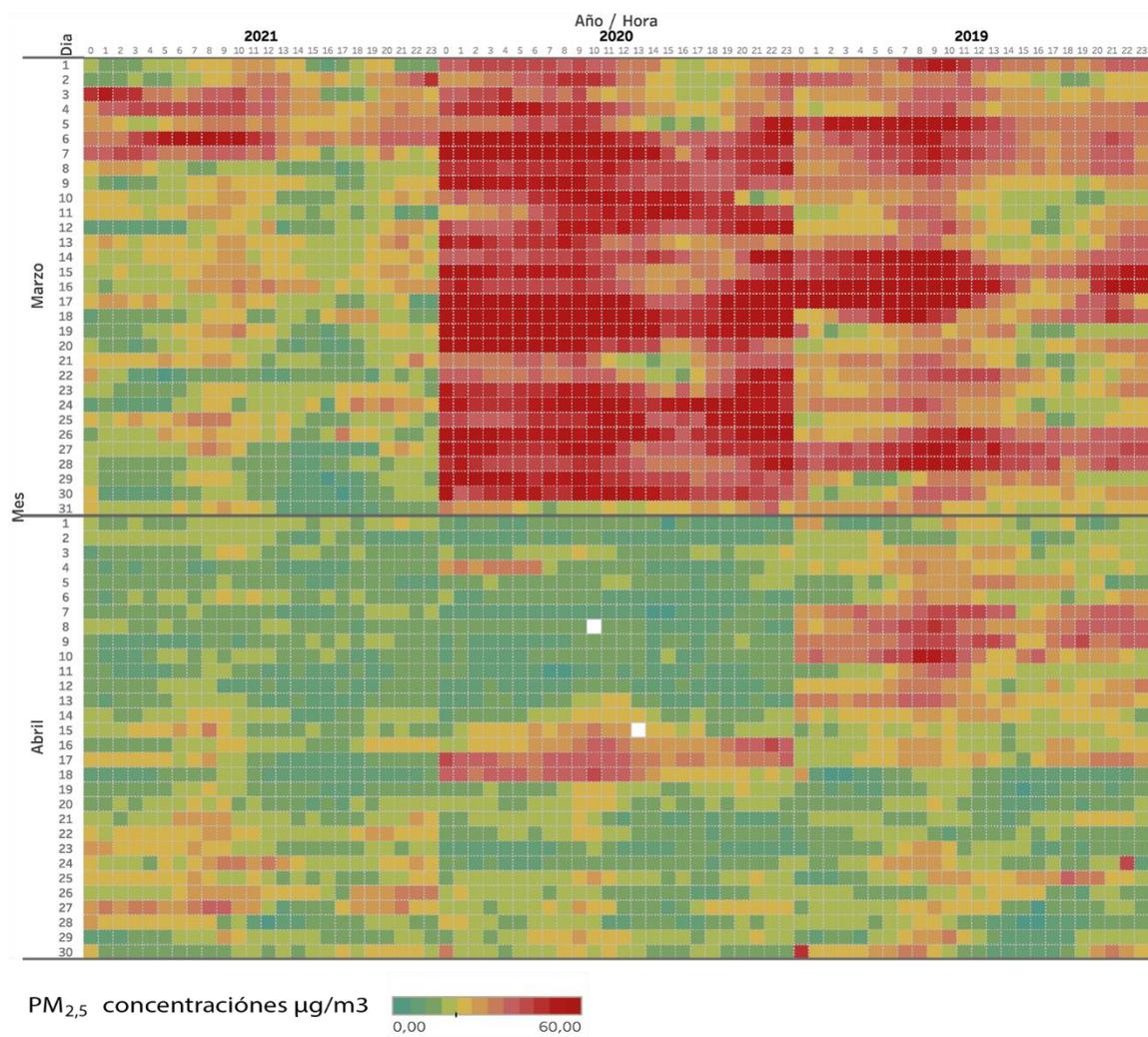


Figura 25 Concentraciones Promedio de estaciones referenciadas por el SIATA con número 12, 44, 79, 80, 83, 84, 85, 86, 94 ubicadas en Medellín, 2019-2021.

4.4.1 Estrategia Escala Ciudad – Comuna

En Medellín, el Área Metropolitana del Valle de Aburra (AMVA) está implementando varias estrategias para la movilidad pública con la intención de hacerla más eficiente, limpia y accesible, pretendiendo la disminución de emisiones de contaminantes. Algunas de estas estrategias son la implementación del Sistema Integrado de transporte Público SITVA, EnCicla, gestión integral del transporte de carga con mejoras tecnológica y de combustibles. Por su parte en el Plan de Gestión del Aire para El área Metropolitana Del Valle De Aburra (PIGECA) se destaca dentro de 10 ejes estratégicos necesarios para cumplir el plan se subrayan el numeral 3, que indica la necesidad de reducir el impacto ambiental de los viajes motorizados, el numeral 4, el cual pretende una transformación hacia una movilidad de bajas emisiones, por último, se destaca el numeral 9, el cual tiene como meta la conversión de zonas sensibles de contaminación. Como parte de estas medidas la resolución metropolitana 002231 del 31 de agosto de 2018 delimitó como se indica en la (Figura 26) la Zonas de Aire Protegido (ZUAP) en el centro de la ciudad de Medellín, esta asignación se realiza a sectores que necesitan medidas de control ambiental por exceder la norma nacional de calidad del aire y que presentar altas concentraciones de contaminantes atmosféricos que pueden afectar la salud de los habitantes (AMVA, 2018).



Figura 26 Delimitación Zona ZUAP, Medellín. Recuperado de (<https://www.carvalho.com.co/post/medellin-estrena-su-primera-zona-urbana-de-aire-protegido-en-el-centro>)

Esta estrategia que según su escala o rango de acción se establece a nivel de ciudad o comuna, es conocida el mundo como Zona de Bajas Emisiones y por sus siglas en Ingles LEZ, se caracterizan por regular o restringir el acceso a un área geográfica definida el acceso a los vehículos y está ampliamente difundida por la Comisión Europea. Las LEZ están destinadas principalmente a reducir las emisiones de PM, aunque algunas también tienen como objetivo reducir los óxidos de nitrógeno NOx. Las primeras LEZ en Europa se delimitaron 1996 en Estocolmo, Göteborg y Malmo en Suecia, donde se las conoce como Zonas Ambientales (Lurkin et al., 2021). Las áreas delimitadas varían significativamente, la ciudad de Londres cuenta con la delimitación más extensa de todas las LEZ declaradas en el mundo con un área de más de 1500 km² (Holman et al., 2015). En Viena la prohibición se establece para toda la ciudad y suma un total de 414 km², en otro caso, Berlín de los 891 km² de su territorio en solo 88 km² cuenta con restricciones asociadas a las LEZ, en el resto Europa se pueden encontrar algunas más pequeñas como las de Roma 5.5km² de

1285 km² y Milán con 8 km² de 181 km². De la misma manera que en la delimitación las restricciones y horarios se establecen con diferencias en cada una de las ciudades, estableciendo distintas reglas para los estándares de emisiones requeridos y los tipos vehículos permitidos. En el caso de Bruselas se restringe la circulación de vehículos diésel estándar EURO 2 y los vehículos propulsados por gasolina de estándar EURO, en Berlín solo automóviles que superen estándar para diésel EURO 4 y gasolina EURO 1 pueden circular (Lurkin et al., 2021). Londres establece una restricción que opera las 24 horas durante todos los días de la semana y se utiliza como control a la medida un registro de vehículos verificado con cámaras equipadas con tecnología de reconocimiento automático de matrículas (Holman et al., 2015).

En Medellín para su ZUAP solo se ha establecido una delimitación de 2.0 km² de 380.64km². Con relación a las restricciones la resolución 02231 de 2018 solo establece acciones por uso indebido de las vías, acciones de control y vigilancia de emisiones vehiculares, labores de control y vigilancia al uso indebido del espacio público, trabajos para la sensibilización y promoción de campañas educativas enfocadas al impacto de la movilidad en la calidad del aire, políticas de parqueo que desmotiven el ingreso de transporte privado a la zona ZUAP (AMVA, 2018). Adicional a esto en la información disponible en la página web del municipio de Medellín www.medellin.gov.co sobre la ZONA ZUAP se indican las fases de implementación de la siguiente manera: Para el 2021 socialización y divulgación del proceso de transformación, en el 2022 y 2023 implementación de medidas.

Con respecto a los resultados positivos de las LEZ se ha podido identificar que reducen las concentraciones de PM_{2.5} en Copenhague (Holman et al., 2015), en Londres el PM₁₀ ha

caído entre un 2,46 y 3,07, en Lisboa se identificaron reducciones significativas en PM_{10} , para 5 ciudades de Países Bajos también se observaron reducciones para NO_x y $PM_{2.5}$ (Lurkin et al., 2021). Sin embargo, estos procesos no han estado libres de controversia, en algunas ciudades de Países Bajos se ha encontrado resistencia de algunos ciudadanos, que inconformes con la restricción que les impide usar sus antiguos vehículos diésel en los centros de la ciudad han tomado acciones legales que han llevado al levantamiento de este tipo de ordenanzas. Es por esto por lo que es importante no dar por sentado el consenso sobre el problema de la calidad del aire y las soluciones necesarias para mitigarlo. (Haakman et al., 2020)

De acuerdo con los avances en la ejecución de la zona ZUAP, le convendría a la ciudad a afianzar la interrelación entre ejes temáticos planteados por el PIGECA ver Figura 27, con la estrategia para las políticas integrales planteada por Haakman en su investigación. Este establece que, aunque las LEZ vienen siendo una política popular y creciente para afrontar los problemas de contaminación atmosférica, existe una falta de comprensión frente al diseño de este tipo de estrategia. En el artículo se propone un modelo denominado STREAMS renovado, el cual incluye problemas, políticas e instrumentos de política y tecnología. Con este modelo se analiza la interacción política de la LEZ, las restricciones de parqueo, los incentivos de subsidio, los incentivos basados en mercados, impuestos sobre combustible y carretera, los descuentos de tarifas de estacionamientos, los sistemas de vehículo compartido y la adopción de tecnologías limpias para determinar la efectividad de esta estrategia en la reducción de contaminantes. En las conclusiones el autor destaca que un solo instrumento de política rara vez puede servir como solución independiente para los desafíos ambientales y sociales complejos, como la calidad del Aire. (Haakman et

al., 2020) es por esto que es importante el seguimiento a las interrelaciones entre las políticas y las acciones o estrategias propuestas por el PIGECA.



Figura 27 Ejes temáticos PIGECA. Fuente AMVA

4.4.2 Escala Barrio – Personal

En los informes de calidad del aire, la OMS ha publicado los riesgos de la contaminación del aire para la salud y ha generado pautas de orientación a las personas y especialmente a los encargados de formular las políticas públicas y responsables de la toma de decisiones. La última versión se publicó en 2006 con un nivel de referencia para la exposición anual promedio de $10 \mu\text{g} / \text{m}^3$ para PM_{2.5} y $20 \mu\text{g} / \text{m}^3$ para PM₁₀ (OMS, 2006), sin embargo, algunos estudios realizados en áreas con niveles de concentraciones por debajo de las recomendaciones vigentes de la OMS evidenciaron que pueden producirse efectos en la salud incluso con bajos niveles de contaminación (Chen & Hoek, 2020).

De acuerdo a la información anterior y teniendo en cuenta que en esta investigación se presentaron resultados que evidencian que el nivel de exposición de los ciclistas puede deberse a una combinación de los factores que mantienen en niveles altos las concentraciones de fondo en la región, no deja de ser importante la búsqueda por reducir al máximo posible los contaminantes atmosféricos a las que se ven enfrentados los ciclistas en las rutas dispuestas para su movilidad, esto sumado a la importancia de generar estrategias para reducir las concentraciones de material particulado (Haakman et al., 2020), es por esto que se muestran a continuación opciones para reducir o no incrementar las concentraciones a partir de intervenciones físicas en las rutas ciclistas.

Una de las intervenciones para de la reducción de contaminantes atmosféricos es la infraestructura verde, que se catalogaran en esta trabajo de dos tipos, pasivas y activas, las pasivas son aquellas que están compuestas solo por especies vegetales y que su eficiencia solo depende de la selección de la especie, tamaño y ubicación dentro de los entornos urbanos. Las activas son las que mezcladas con elementos mecánicos y tecnológicos logran el objetivo de reducir las concentraciones de contaminantes.

Dentro de las pasivas, dos investigaciones estudian la eficacia de estos elementos en los entornos urbanos, Abhijith & Kumar, (2019) estudiaron la influencia de la infraestructura verde en las carreteras bajo tres configuraciones (Figura 28) solo setos, solo árboles y una mezcla de árboles y setos o arbustos, separados entre sí, pero con condiciones viales cercanas. Estas configuraciones resultaron en 6 escenarios diferentes para la evaluación. La reducción más alta de contaminantes se presenta en la configuración mixta árboles y setos mientras que la disposición de solo arboles mostro aumento en la mayoría de los contaminantes. Por otro lado, Jia y otros (2021) implementaron un experimento de campo (Figura 29) que permitió medir y contrastar los niveles de concentración de PM en carriles

de bicicleta y aceras y cerca de edificios residenciales. En los resultados de este estudio se demuestra que la presencia de infraestructura verde elevó significativamente las concentraciones de PM en los carriles para bicicletas y andenes, pero trajo reducciones significativas en las concentraciones cerca de los edificios residenciales.

Con el contraste de estos dos estudios se establece la importancia de adicionar criterios ambientales en los diseños de las ciclorrutas que permitan mitigar las exposiciones a altas concentraciones de contaminantes.

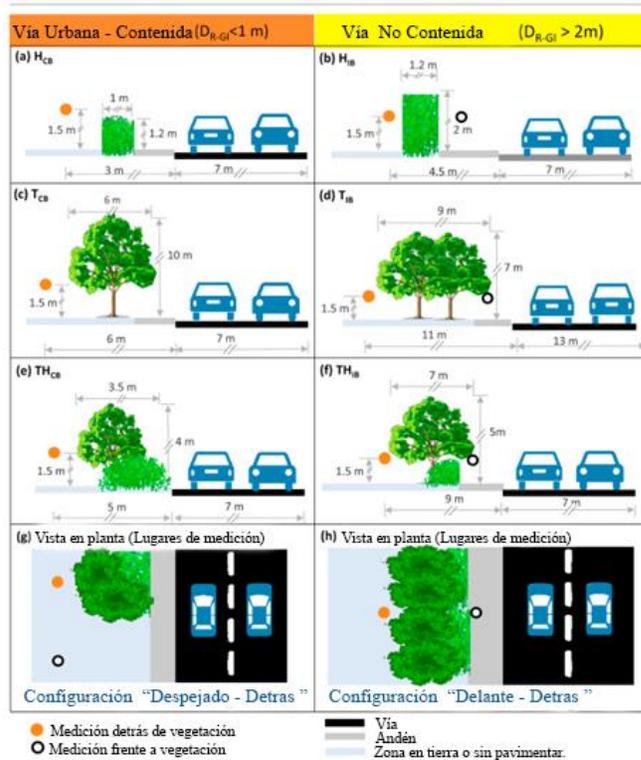


Figura 28 (Abhijith & Kumar, 2019) Representación esquemática de seis ubicaciones de seguimiento con el tipo de GI y detalles de la carretera. El círculo naranja y el anillo negro indican los puntos de medición detrás. Recuperado de "Field investigations for evaluating green infrastructure effects on air quality in open-road conditions"

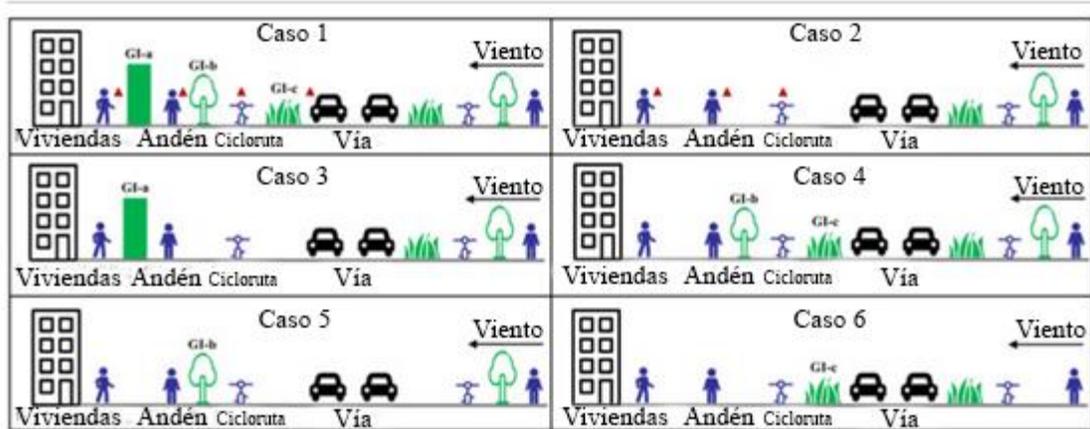


Figura 29 (Jia et al., 2021) Esquemas de seis configuraciones infraestructura verde de carretera. Las simulaciones numéricas se centran en el lado residencial de la sección de la carretera. Las mediciones de campo se realizaron en el Caso 1 (caso con presencia de infraestructura verde) y el caso 2 (sin infraestructura verde). Tanto en los casos de presencia de infraestructura verde como en los casos de ausencia, los triángulos rojos muestran los sitios de muestreo cerca de los carriles para bicicletas, aceras y edificios residenciales. Recuperado de “Effects of roadside green infrastructure on particle exposure: A focus on cyclists and pedestrians on pathways between urban roads and vegetative barriers”

En la infraestructura verde activa Pettit y otros (2021) describen un dispositivo de biofiltración botánica (Figura 30) con la capacidad de reducir las concentraciones de $PM_{2.5}$ en un 22.1%. Esta tecnología toma paredes verdes activas, desarrolladas a partir de una extensión del concepto de fitorremediación. El dispositivo tiene plantas dispuestas a lo largo de un panel vertical y usan un “flujo de aire activo” el cual fuerza mecánicamente una corriente de aire a través del follaje de la planta y el sustrato de crecimiento por donde el aire regresa al exterior. En este proceso la matriz de crecimiento de las plantas filtra mecánicamente los contaminantes (Pettit et al., 2018a). Este dispositivo sigue en desarrollo y con miras a una escalabilidad mayor que permita mejores resultados, sin embargo, presenta un potencial interesante para implantar en zonas como las identificadas

en esta investigación como “hotspots” ya que requiere poco espacio y el tamaño de las paredes podría incrementarse según las necesidades de filtración (Pettit et al., 2021).

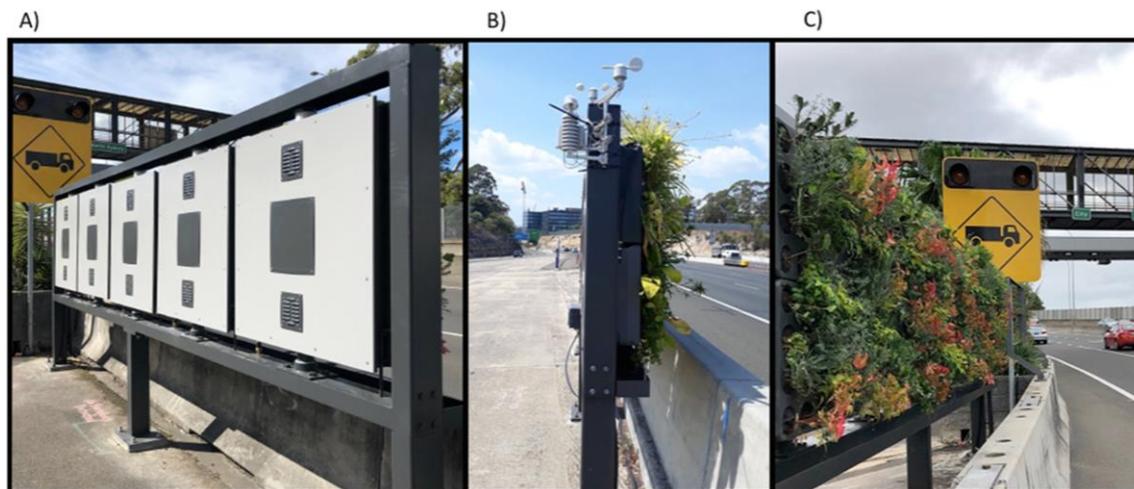


Figura 30 Biofiltros botánicos. (A) la vista posterior de una matriz de biofiltros que muestra cinco plenums dispuestos horizontalmente para formar una pared verde activa de 5 m²; (B) una vista lateral de la estructura de soporte con módulos de biofiltros. Recuperado de “Effective reduction of roadside air pollution with botanical biofiltration “

Para finalizar el componente de posibles estrategias para la reducción a la exposición de PM_{2.5} se presentan algunas soluciones de escala personal que permitirían en momentos de alertas ambientales por mala calidad del aire en la ciudad, seguir usando medios no motorizados para la movilidad urbana.

Las mascarillas faciales son una protección efectiva, fácil de usar y de bajo costo contra los patógenos o agentes infecciosos transportados por el aire, como el material particulado PM_{2.5} o el virus SARS-CoV-2 que causa la enfermedad COVID-19. Si bien las máscaras generan efectos de filtración inmediatos, la diferencia en eficiencia entre marcas es significativa y no es posible establecer una relación entre la eficiencia y el costo, por cual se sugiere elegir una mascarilla por la calidad de sus filtros y no por el valor establecido para la venta (Pacitto et al., 2019). Otro desarrollo reciente en mascarillas es la “mascara

activa” (Figura 31) elemento de protección personal equipado con sensores y actuadores inteligentes que pueden detectar la presencia de patógenos en el aire en tiempo real y tomar medidas adecuadas para mitigar o evitar la amenaza. Un controlador a bordo determina la calidad del aire por medio de un sensor comercial de partículas, y de ser necesario activa un actuador piezoeléctrico que genera una niebla con la intención de cargar las partículas y hacerlas caer al suelo. Toda la información se puede consultar mediante un dispositivo móvil, el cual puede proporcionar varias alertas mediante el uso de una aplicación diseñada para esta función. Los resultados iniciales de este prototipo indican que se puede generar una reducción significativa de los recuentos de material particulado en el aire cerca a la máscara cuando esta tiene el sistema de protección activo. La información en tiempo real de este tipo de dispositivos permitiría una toma de decisiones acertadas al momento de elegir la bicicleta como medio de transporte urbano habitual (Kalavakonda et al., 2021).



Figura 31 Mascara Activa. (a) Vista frontal, (b) lateral del diseño de la máscara inteligente, incluidas las dimensiones. (c) Prototipo de la máscara inteligente. (d) Máscara inteligente operativa con módulos de detección y mitigación. (e) Configuración experimental que muestra una mascarilla inteligente y un humidificador. (f) Sensor de PM (tamaño: 41,2 mm x 41,2 mm) utilizado en los experimentos. (g) Humidificador utilizado para imitar los aerosoles producidos por la actividad humana. (h) Captura de pantalla de los datos que se recopilan, procesan y visualizan en la aplicación móvil. Recuperado de "A Smart Mask for Active Defense against Coronaviruses and Other Airborne Pathogens"

5. CONCLUSIONES

5.1 Conclusiones y Recomendaciones

De acuerdo con los resultados, la exposición a PM_{2.5} en el BSS de Medellín es mayor en la mañana, entre las 06:00 y las 10:00 horas. Este es uno de los periodos con mayor actividad en el sistema EnCicla en cuanto a número de viajeros. En Medellín, las universidades comienzan las clases a las 06:00 y la mayoría de las oficinas abren a las 08:00; por lo tanto, los viajes en bicicleta realizados por estudiantes y personas camino al trabajo se ven afectados (negativamente) debido a los valores altos de concentración de PM_{2.5}.

Los resultados muestran que, en la transición de la temporada seca a la húmeda, las concentraciones en la mañana pueden estar alrededor de valores clasificados como dañinos para grupos sensibles de personas (por ejemplo, niños o ancianos), por lo que los ciclistas deben estar al tanto de esta situación si se encuentran incluidos en estos grupos y utilizan una protección eficaz como las máscaras (Wcherrie et al., 2018; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017), como se implementa en otros países como los Países Bajos y China. También deben realizar viajes cortos, combinando sus viajes con el sistema de transporte público con estaciones BSS integradas, para evitar exposiciones extremas. Incluir concentraciones de contaminantes en la ecuación al momento de optar por la bicicleta como medio de transporte puede inducir una disminución en las demandas

del sistema durante la transición de temporada que debe incluirse en la planificación de nuevas rutas o adquisición de bicicletas.

Eventos como el confinamiento derivado de la enfermedad COVID 19 evidencian la vulnerabilidad de la ciudad ante fenómenos externos como la quema de biomasa en el Orinoco y la erosión transporte de aerosoles en áreas provenientes del desierto del Sahara. Debido a las concentraciones de fondo que generan altas concentración en toda la ruta seleccionada para las mediciones. Alternativas como las barreras vegetales activas y pasivas deben investigarse más a fondo en el contexto local para validar su eficacia ante la situación descrita.

Los túneles de dosel son atractivos para el usuario en los carriles para bicicletas por dos razones principales: 1) un paisaje atractivo y 2) comodidad térmica. De hecho, los árboles tienen la capacidad de retener y absorber las partículas producidas por los automóviles (Chen et al., 2017), pero la velocidad a la que se producen estas partículas es superior a la capacidad de absorción de los árboles. Estas configuraciones de túneles de dosel también se identificaron como puntos críticos de contaminación en un estudio de la expansión del sistema de tránsito rápido de autobuses locales en la ciudad (Metroplus, 2017). La estructura física de un túnel de dosel crea un bloqueo para la dispersión de contaminantes en la atmósfera. La opción de cortes estratégicos en el dosel, para proteger la integridad ecológica de las rutas y asegurar la dispersión vertical de partículas, debe ser estudiada más a fondo.

Entre los meses febrero, marzo, abril se puede observar como las concentraciones de fondo influye en la situación de las rutas. Teniendo en cuenta la posibilidad de un aumento en las concentraciones en los meses siguientes por la influencia de factores relacionados

con el parque automotor, las siguientes investigaciones sobre el tema deberán separar las contribuciones del medio natural y del medio antrópico para proponer y generar mejores estrategias.

Las concentraciones de fondo afectan todos los tipos de ciclo infraestructura disponible en la ciudad, es importante que los nuevos diseños de ciclo infraestructura involucren una articulación o modificación a la infraestructura verde de tipo “pasiva” existente de tal forma que en conjunto reduzcan lo máximo posible las concentraciones para contaminantes atmosféricos en los puntos críticos como los expuestos en esta investigación. Los sistemas activos de filtros y de predicción de concentraciones deberán ser un tema relevante en futuras investigaciones para promover y garantizar el uso de la bicicleta y llegar al 2030 con el 10% de participación en viajes realizados en el área metropolitana del Valle de Aburrá, objetivo principal del Plan Maestro de la Bicicleta 2030.

5.2 Referencias

- A.J. Badyda, J. Grellier, P. Dąbrowiecki. Ambient PM_{2.5} exposure and mortality due to lung cancer and cardiopulmonary diseases in polish cities
- M. Pokorski (Ed.), Respiratory Treatment and Prevention, Advances in Experimental Medicine and Biology, vol. 944, Springer, Cham (2016), pp. 9-17
- Abhijith, K. V., & Kumar, P. (2019). Field investigations for evaluating green infrastructure effects on air quality in open-road conditions. *Atmospheric Environment*, 201(October 2018), 132–147. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.12.036>
- A. C. Rai and *et al.*, “End-user perspective of low-cost sensors for outdoor air pollution monitoring,” *Sci. Total Environ.*, vol. 607-608, December 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.>
- Air pollution. World Health Organization. Accessed Sep. 10, 2019. [Online]. Available: Available: <https://bit.ly/35cbxIM> [Links]
- Aguiar-Gil, D., Gómez-Peláez, L. M., Álvarez-Jaramillo, T., Correa-Ochoa, M. A., & Saldarriaga-Molina, J. C. (2020). Evaluating the impact of PM_{2.5} atmospheric pollution on population mortality in an urbanized valley in the American tropics. *Atmospheric Environment*, 224(February). <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117343>
- Amaral, S. S., de Carvalho, J. A., Costa, M. A. M., & Pinheiro, C. (2015). An overview of particulate

- matter measurement instruments. *Atmosphere*, 6(9), 1327–1345. <https://doi.org/10.3390/atmos6091327>
- Ardon-Dryer, K., Huang, Y. W., & Cziczo, D. J. (2015). Laboratory studies of collection efficiency of sub-micrometer aerosol particles by cloud droplets on a single-droplet basis. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(16), 9159–9171. doi:10.5194/acp-15-9159-2015
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2015). Plan Maestro Metropolitano de la Bicicleta del Valle de Aburrá (PMB2030).
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2016). ICA (Índice de Calidad de Aire). Calidad de Aire. Retrieved from <http://www.metropol.gov.co/CalidadAire/Paginas/ica.aspx>
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá; Universidad EAFIT. (2020). Informe Anual de Calidad del Aire 2020 Contrato Ciencia y Tecnología 871 de 2020.
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2017). *Informe Anual Aire 2016*.
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Resolución 1379 de 2017. , Pub. L. No. 1379 (2017). Retrieved from http://www.metropol.gov.co/pmes/Resolucion1379_2017_Planes_MES.PDF
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá; Universidad Pontificia Bolivariana. (2019). Actualización Inventario de Emisiones Atmosféricas del Valle de Aburrá - Año 2018. <https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/Paginas/Herramientas-de-gestion/Inventario-de-emisiones-atmosfericas.aspx>
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2016). Informe de Gestión 2014. 531100.
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2020). Plan Maestro de Movilidad para el Valle de Aburrá.
- Arregocés, H. A., Rojano, R., & Restrepo, G. (2021). Impact of lockdown on particulate matter concentrations in Colombia during the COVID-19 pandemic. *Science of the Total Environment*, 764, 142874. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142874>
- B. Efron, "Better bootstrap confidence intervals," *J. Am. Stat. Assoc.*, vol. 82, no. 397, pp. 171-185, Mar. 1987.
- B. Larsen Colombia Perspectives Air Pollution, Tech. Rep., Post 2015 Consensus (2015)
- Bedoya, J., & Martínez, E. (2008). Calidad del Aire en el Valle de Aburrá. *Antioquia Colombia. Revista Dina*, 158, 7–15. Retrieved from <http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v76n158/a01v76n158.pdf>
- Bedoya, J., & Martínez, E. (2009). Calidad del aire en el valle de aburrá Antioquia-Colombia. *DYNA (Colombia)*, 76(158), 7–15.
- Berghmans, P., Bleux, N., Panis, L. I., Mishra, V. K., Torfs, R., & Van Poppel, M. (2009). Exposure assessment of a cyclist to PM10 and ultrafine particles. *Science of the Total Environment*, 407(4), 1286–1298. doi:10.1016/j.scitotenv.2008.10.041
- Bigazzi, A. Y., & Figliozzi, M. a. (2014). Review of Urban Bicyclists' Intake and Uptake of Traffic-Related Air Pollution. *Transport Reviews*, 34(2), 221–245. doi:10.1080/01441647.2014.897772
- Bigazzi, A. Y., Figliozzi, M. a., Luo, W., & Pankow, J. F. (2016). Breath Biomarkers to Measure Uptake of Volatile Organic Compounds by Bicyclists. *Environmental Science and Technology*, 50(10), 5357–5363. doi:10.1021/acs.est.6b01159
- Buehler, R., Götschi, T., & Winters, M. (2016). Moving Toward Active Transportation: How Policies

PM_{2.5} en el sistema de bicicletas públicas en la ciudad de Medellín.

Can Encourage Walking and Bicycling. Active Living Research.

Cielómetro cl51. Vaisala. Accessed Sep. 20, 2019. [Online]. Available: <https://bit.ly/2QAUZzQ>

Carnevale, C., Finzi, G., Pisoni, E., Volta, M., Guariso, G., Gianfreda, R., Maffei, G., Thunis, P., White, L., & Triacchini, G. (2012). An integrated assessment tool to define effective air quality policies at regional scale. *Environmental Modelling and Software*, 38, 306–315. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.07.004>

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(1), 1–11. doi:10.1038/s41598-017-03360-1

Chen, J., & Hoek, G. (2020). Long-term exposure to PM and all-cause and cause-specific mortality: A systematic review and meta-analysis. *Environment International*, 143(February), 105974. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105974>

Cherrie, J. W., Apsley, A., Cowie, H., Steinle, S., Mueller, W., Lin, C., ... Loh, M. (2018). Effectiveness of face masks used to protect Beijing residents against particulate air pollution. *Occupational and Environmental Medicine*, oemed-2017-104765. doi:10.1136/oemed-2017-104765

CLEAN AIR INSTITUTE. (2017). Para implementar los instrumentos de gestión formulados para el mejoramiento de calidad del aire en el valle de Aburrá, y hacer seguimiento y evaluación a su efectividad. 162. <https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/Documents/PIGECA/PIGECA-Aprobado-Dic-2017.pdf>

Cooper, C. H. V. (2017). Using spatial network analysis to model pedal cycle flows, risk and mode choice. *Journal of Transport Geography*, 58, 157–165. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2016.12.003>

Cooper, M. (2010). Advanced Bash-Scripting Guide An in-depth exploration of the art of shell scripting Table of Contents. Okt 2005 Abrufbar Uber [Httpwww Tldp orgLDPabsabsguide Pdf](http://www.tldp.org/LDP/absabsguide/Pdf) Zugriff 1112 2005, 2274(November 2008), 2267–2274. doi:10.1002/hyp

Corno, F., Montanaro, T., Migliore, C., & Castrogiovanni, P. (2017). SmartBike: An IoT crowd sensing platform for monitoring city air pollution. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 7(6), 3602–3612. doi:10.11591/ijece.v7i6.pp3602-3612

Demaio, P., & MetroBike, L. (2009). Bike-sharing : History, Impacts, Models of Provision, and Future. *Journal of Public Transportation*, 12(4), 41–56. doi:doi.org/10.5038/2375-0901.12.4.3

Departamento Administrativo de Planeación, M. de M. (2018). Boletín de seguimiento al POT de Medellín : subsistema de movilidad . (Vol. 2016). https://medellin.gov.co/irj/go/km/docs/pccdesign/medellin/Temas/PlaneacionMunicipal/Programas/Shared_Content/Documentos/2019/POT/Boletin-Movilidad-Sostenible-Seguimiento-POT.pdf

Duque, J. F. (2017). Sobre los efectos de la Contaminación Atmosférica en la Salud (Basado en el texto Clean the air for children, UNICEF, 2016). 13.

Elen, B., Peters, J., van Poppel, M., Bleux, N., Theunis, J., Reggente, M., & Standaert, A. (2013). The Aeroflex: A bicycle for mobile air quality measurements. *Sensors (Switzerland)*, 13(1), 221–240. doi:10.3390/s130100221

Emeis, S., Schäfer, K., Münkel, C., Piringer M, J. S. B. a, C. a, D. M. D. R. K. E. S. M. P. T. M. M. D.

- B.-S. K. D. a, K. a and B. J., K, E. S. and S., Schäfer K, E. S. H. H. and J. C., ... S, R. O. U. E. (2008). Long-term observations of the urban mixing-layer height with ceilometers. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1(1), 012027. doi:10.1088/1755-1307/1/1/012027
- English, P. B., Richardson, M. J., & Gar On-Galvis, C. (2018). From Crowdsourcing to Extreme Citizen Science: Participatory Research for Environmental Health. *Annual Review of Public Health Annu. Rev. Public Health*, 39, 335–50. doi:10.1146/annurev-publhealth
- EPA. (2011). *Exposure Factors Handbook: 2011 Edition*. doi:EPA/600/R-090/052F
- Fajardo, O. a., & Rojas, N. Y. (2012). Particulate matter exposure of bicycle path users in a high-altitude city. *Atmospheric Environment*, 46, 675–679. doi:10.1016/j.atmosenv.2011.09.047
- Gabrys, J. (2017). The Becoming Environmental of Computation From Citizen Sensing to Planetary Computerization. *Tecnoscienza*, 8(1), 5–21.
- Gao, M., Cao, J., & Seto, E. (2015). A distributed network of low-cost continuous reading sensors to measure spatiotemporal variations of PM_{2.5} in Xi'an, China. *Environmental Pollution*, 199, 56–65. doi:10.1016/j.envpol.2015.01.013
- GPSA 14 ed 2017 - SI. (2017). *Product Specifications*. GPSA 14 Ed, (12).
- Graff, D. W., Cascio, W. E., Rappold, A., Zhou, H., Huang, Y. C. T., & Devlin, R. B. (2009). Exposure to concentrated coarse air pollution particles causes mild cardiopulmonary effects in healthy young adults. *Environmental Health Perspectives*, 117(7), 1089–1094. doi:10.1289/ehp.0900558
- Gómez, C., 2021. 9,2 % de muertes en el Valle de Aburrá son por contaminación. [online] www.elcolombiano.com. Available at: <<https://www.elcolombiano.com/antioquia/contaminacion-responsable-de-parte-de-las-muertes-por-causas-naturales-en-medellin-AD5849992>> [Accessed 29 October 2021].
- Goyal, P., Gulia, S., & Goyal, S. K. (2021). Identification of air pollution hotspots in urban areas - An innovative approach using monitored concentrations data. *Science of the Total Environment*, 798, 149143. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149143>
- Gurjar, B. R., Butler, T. M., Lawrence, M. G., & Lelieveld, J. (2008). Evaluation of emissions and air quality in megacities. *Atmospheric Environment*, 42(7), 1593–1606. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.10.048>
- HabitatMap. 2021. HabitatMap is an environmental tech organization.. [online] Available at: <<https://www.habitatmap.org/>> [Acceso 27 October 2021].
- Haddad, H., & de Nazelle, A. (2018). The role of personal air pollution sensors and smartphone technology in changing travel behaviour. *Journal of Transport & Health*, (August), 1–14. doi:10.1016/j.jth.2018.08.001
- Hao, Y., Zhang, G., Han, B., Xu, X., Feng, N., Li, Y., ... Xia, Z. L. (2017). Prospective evaluation of respiratory health benefits from reduced exposure to airborne particulate matter. *International Journal of Environmental Health Research*, 27(2), 126–135. doi:10.1080/09603123.2017.1292497
- Haakman, R., Beenakker, I., & Geerlings, H. (2020). Reducing vehicle-related NO_x and PM emissions in metropolitan areas: A comparison between the Randstad and the Rhine-Ruhr area. *Journal of Cleaner Production*, 247, 119175.
- Histórico, E. del valor. (2017). *Componente Ambiental Para La Construcción*. 63.

PM_{2.5} en el sistema de bicicletas públicas en la ciudad de Medellín.

-
- Holman, C., Harrison, R., & Querol, X. (2015). Review of the efficacy of low emission zones to improve urban air quality in European cities. *Atmosph*
- Herrera Mejía, L. (2015). Caracterización de la Capa Límite Atmosférica en el valle de Aburrá a partir de la información de sensores remotos y radiosondeos. Universidad Nacional de Colombia. Retrieved from <http://bdigital.unal.edu.co/51042/>
- Hu, Y., Fan, J., Zhang, H., Chen, X., & Dai, G. (2016). An estimated method of urban PM_{2.5} concentration distribution for a mobile sensing system. *Pervasive and Mobile Computing*, 25, 88–103. doi:10.1016/j.pmcj.2015.06.004
- Jia, Y. P., Lu, K. F., Zheng, T., Li, X. B., Liu, X., Peng, Z. R., & He, H. Di. (2021). Effects of roadside green infrastructure on particle exposure: A focus on cyclists and pedestrians on pathways between urban roads and vegetative barriers. *Atmospheric Pollution Research*, 12(3), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2021.01.017>
- Johansson, C., Lövenheim, B., Schantz, P., Wahlgren, L., Almström, P., Markstedt, A., ... Sommar, J. N. (2017). Impacts on air pollution and health by changing commuting from car to bicycle. *Science of the Total Environment*, 584-585, 55–63. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.01.145
- K. Pearson, "Note on regression and inheritance in the case of two parents," *Proc. R. Soc. London*, vol. 58, pp. 240-242, 1895.
- Kalavakonda, R. R., Masna, N. V. R., Bhuniaroy, A., Mandal, S., & Bhunia, S. (2021). A Smart Mask for Active Defense against Coronaviruses and Other Airborne Pathogens. *IEEE Consumer Electronics Magazine*, 10(2), 72–79. <https://doi.org/10.1109/MCE.2020.3033270>
- Kampa, M., & Castanas, E. (2008). Human health effects of air pollution. *Environmental Pollution*, 151(2), 362–367. doi:10.1016/j.envpol.2007.06.012
- Kuula, J., Kuuluvainen, H., Rönkkö, T., Niemi, J. V., Saukko, E., Portin, H., Aurela, M., Saarikoski, S., Rostedt, A., Hillamo, R., & Timonen, H. (2019). Applicability of optical and diffusion charging-based particulate matter sensors to urban air quality measurements. *Aerosol and Air Quality Research*, 19(5), 1024–1039. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2018.04.0143>
- Lopez, E. M., & Arbelaez, M. P. (2012). Mortalidad por Enfermedades Respiratorias y Calidad del Aire en Medellín. In *Facultad Nacional de Salud pública (Vol. 7)*. <http://guajiros.udea.edu.co>
- Lurkin, V., Hambuckers, J., & van Woensel, T. (2021). Urban low emissions zones: A behavioral operations management perspective. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 144(November 2020), 222–240. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.11.015>
- Madelin, M., & Duché, S. (2015). Low cost air pollution sensors: New perspectives for the measurement of individual exposure? *International Conference on Urban Climate, ICUC9*, (Table 2). Retrieved from <http://www.meteo.fr/icuc9/Poster/NOMTM.pdf>
- Maher, B. a., Ahmed, I. a M., Davison, B., Karloukovski, V., & Clarke, R. (2013). Impact of roadside tree lines on indoor concentrations of traffic-derived particulate matter. *Environmental Science and Technology*, 47(23), 13737–13744. doi:10.1021/es404363m
- Malaver, C. (2016). Estudio de la Universidad EAN sobre efectos de contaminación del aire en ciclistas - Archivo Digital de Noticias de Colombia y el Mundo desde 1.990 - eltiempo.com. Retrieved May 25, 2017, from <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-16631425>
- Mejía-Echeverry, D., Chaparro, M., Duque-Trujillo, J., Chaparro, M., Castañeda Miranda, A., Mejía-Echeverry, D., ... Castañeda Miranda, A. G. (2018). Magnetic Biomonitoring as a Tool for

- Assessment of Air Pollution Patterns in a Tropical Valley Using *Tillandsia* sp. *Atmosphere*, 9(7), 283. doi:10.3390/atmos9070283
- Mendez-Espinosa, J. F., Rojas, N. Y., Vargas, J., Pachón, J. E., Belalcazar, L. C., & Ramírez, O. (2020). Air quality variations in Northern South America during the COVID-19 lockdown. *Science of the Total Environment*, 749(2), 141621. <https://doi.org/10.1016/j.sc>
- Mertens, L., Compernelle, S., Deforche, B., Mackenbach, J. D., Lakerveld, J., Brug, J., ... Van Dyck, D. (2017). Built environmental correlates of cycling for transport across Europe. *Health and Place*, 44(April 2016), 35–42. doi:10.1016/j.healthplace.2017.01.007
- Mertens, L., Compernelle, S., Gheysen, F., Deforche, B., Brug, J., Mackenbach, J. D., ... De Bourdeaudhuij, I. (2016). Perceived environmental correlates of cycling for transport among adults in five regions of Europe. *Obesity Reviews*, 17(February), 53–61. doi:10.1111/obr.12379
- Mertens, L., Van Cauwenberg, J., Ghekiere, A., De Bourdeaudhuij, I., Deforche, B., Van de Weghe, N., & Van Dyck, D. (2016). Differences in environmental preferences towards cycling for transport among adults: a latent class analysis. *BMC Public Health*, 16(1), 782. doi:10.1186/s12889-016-3471-5
- Metroplús, & Universidad Nacional de Colombia. (2017). Estudio del valor histórico, cultural, paisajístico y evaluación de impactos del componente ambiental para la construcción del tramo 2B-Metroplús en escenarios con y sin proyecto, municipio de Envigado Antioquia. Retrieved from <http://metroplus.gov.co/tramo-2b-palgrande-la-frontera/>
- Metroplus. (2017). Componente Ambiental Para La Construcción. 63.
- Midgley, P. (2011). BICYCLE-SHARING SCHEMES: ENHANCING SUSTAINABLE MOBILITY.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). 96-Res 2254 De 2017.Pdf (p. 11).
- Murillo-Escobar, J., Sepulveda-Suescun, J. P., Correa, M. A., & Orrego-Metaute, D. (2019). Forecasting concentrations of air pollutants using support vector regression improved with particle swarm optimization: Case study in Aburrá Valley, Colombia. *Urban Climate*, 29(March), 100473. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100473>
- Pacitto, A., Amato, F., Salmatonidis, A., Moreno, T., Alastuey, A., Reche, C., Buonanno, G., Benito, C., & Querol, X. (2019). Effectiveness of commercial face masks to reduce personal PM exposure. *Science of the Total Environment*, 650, 1582–1590. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.109>
- Pankow, J., Figliozzi, M., & Bigazzi, A. (2014). Evaluation of Bicyclists Exposure to Traffic-Related Air Pollution along Distinct Facility Types (Issue NITC-RR-560). http://pdxscholar.library.pdx.edu/cengin_fac%0Ahttp://dx.doi.org/10.15760/trec.121%0Ahttps://www.google.cz/search?q=journal&site=search=.ipsd.org&gws_rd=cr&ei=Bp9FWaDrFsXaUfrAjYAC%0Ahttp://archives.pdx.edu/ds/psu/15962
- Particle sensing. Shinyei Technology. (n.d.). 2018. Retrieved August 8, 2021, from <https://www.shinyei.co.jp/stc/eng/products/optical/ppd60pv.html>
- Pettit, T., Torpy, F. R., Surawski, N. C., Fleck, R., & Irga, P. J. (2021). Effective reduction of roadside air pollution with botanical biofiltration. *Journal of Hazardous Materials*, 414(February), 125566. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125566>
- Pucher, J., Dill, J., & Handy, S. (2010). Infrastructure, programs, and policies to increase bicycling: An international review. *Preventive Medicine*, 50(SUPPL.), S106–S125. <https://doi.org/10.1016/j.ypped.2009.07.028>

-
- Peters, J., Theunis, J., Van Poppel, M., & Berghmans, P. (2013). Monitoring PM₁₀ and ultrafine particles in urban environments using mobile measurements. *Aerosol and Air Quality Research*, 13(2), 509–522. doi:10.4209/aaqr.2012.06.0152
- Rai, A. C., Kumar, P., Pilla, F., Skouloudis, A. N., Di Sabatino, S., Ratti, C., ... Rickerby, D. (2017). End-user perspective of low-cost sensors for outdoor air pollution monitoring. *Science of the Total Environment*, 607-608, 691–705. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.06.266
- Rendón, A. M., Salazar, J. F., Palacio, C. a., & Wirth, V. (2015). Temperature inversion breakup with impacts on air quality in urban valleys influenced by topographic shading. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 54(2), 302–321. doi:10.1175/JAMC-D-14-0111.1
- Rodríguez-Gómez, C., Echeverry, G., Jaramillo, A., & Ladino, L. A. (2021). The Negative Impact of Biomass Burning and the Orinoco Low-Level Jet on the Air Quality of the Orinoco River Basin. *Atmósfera*, February. <https://doi.org/10.20937/atm.52979>
- Sauer, B. (2014). Estrategias urbanas para una ciudad más sostenible 1.
- S. S. Shapiro and M. B. Wilk, "An analysis of variance test for normality (complete samples)," *Biometrika*, vol. 52, no. 3- 4, December 1965. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1093/biomet/52.3-4.591>
- Sousan, S., Koehler, K., Hallett, L., & Peters, T. M. (2017). Evaluation of consumer monitors to measure particulate matter. *Journal of Aerosol Science*, 107(October 2016), 123–133. doi:10.1016/j.jaerosci.2017.02.013
- Steven M. Singer, Marc Y. Fink, V. V. A. (2019). Evaluation of consumer monitors to measure particulate matter. *Physiology & Behavior*, 176(3), 139–148. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2017.02.013>.Evaluation
- Steven M. Singer, Marc Y. Fink, V. V. A. (2019). Evaluation of consumer monitors to measure particulate matter. *Physiology & Behavior*, 176(3), 139–148. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2017.02.013>.Evaluation
- Steve Zhou, S., Lukula, S., Chiossone, C., Nims, R. W., Suchmann, D. B., & Ijaz, M. K. (2018). Assessment of a respiratory face mask for capturing air pollutants and pathogens including human influenza and rhinoviruses. *Journal of Thoracic Disease*, 10(3), 2059–2069. doi:10.21037/jtd.2018.03.103
- Stewart, G., Anokye, N. K., & Pokhrel, S. (2015). What interventions increase commuter cycling? A systematic review. *BMJ Open*, 5(8), e007945. doi:10.1136/bmjopen-2015-007945
- Taddia, A., & Jones, T. (2016). ¡ A Todo Pedal ! <https://publications.iadb.org/handle/11319/7530>
- Tainio, M., de Nazelle, A. J., Götschi, T., Kahlmeier, S., Rojas-Rueda, D., Nieuwenhuijsen, M. J., ... Woodcock, J. (2015). Can air pollution negate the health benefits of cycling and walking? *Preventive Medicine*, 87, 233–236. doi:10.1016/j.ympmed.2016.02.002
- The air casting platform. Habitatmap. Accessed Aug. 01, 2017. [Online]. Available: Available: <http://aircasting.org/> [Links]
- Treatment, R. (2017). *Respiratory Treatment and Prevention* (Vol. 944). <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-44488-8>
- Vaisala. (2010). CL51 Ceilometer for High-Range Cloud Height Detection.

OMS. (2016). WHO Global Urban Ambient Air Pollution Database. Public health, environmental and social determinants of health (PHE). Retrieved August 1, 2017, from http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/databases/cities/en/

Wiegner, M., Madonna, F., Biniotoglou, I., Forkel, R., Gasteiger, J., Geiß, a., ... Thomas, W. (2014). What is the benefit of ceilometers for aerosol remote sensing? An answer from EARLINET. *Atmospheric Measurement Techniques*, 7(7), 1979–1997. doi:10.5194/amt-7-1979-2014

Wilson, W. E., Chow, J. C., Claiborn, C., Fusheng, W., Engelbrecht, J., & Watson, J. G. (2002). Monitoring of particulate matter outdoors. *Chemosphere*, 49(9), 1009–1043. [https://doi.org/10.1016/s0045-6535\(02\)00270-9](https://doi.org/10.1016/s0045-6535(02)00270-9)

Wcherrie, J., Apsley, A., Cowie, H., Steinle, S., Mueller, W., Lin, C., Horwell, C. J., Sleeuwenhoek, A., & Loh, M. (2018). Effectiveness of face masks used to protect Beijing residents against particulate air pollution. *Occupational and Environmental Medicine*, 75(6), 446–452. <https://doi.org/10.1136/oemed-2017-104765>

World Bank. (2020). The Global Health Cost of Ambient PM2.5 Air Pollution. 55

6. ANEXOS

REGISTRO FOTOGRÁFICO PUNTOS CRÍTICOS - “HOTSPOTS”

