

Pontificia Universidad Javeriana Cali
Facultad de Ingeniería y Ciencias
Informe Final Concurso Cali Respira

Determinación de concentraciones de PM2.5 con sensores Airbeam en
diferentes modos de transporte en trayectos en las comunas 17 y 22 en Cali,
Colombia.

Yan Carlos Certuche Grueso
Laura Juliana Caro Moreno
Anderson Laverde Gracia
Yeison Andrés Navia Samboní

Director: Ph.D. Drochss Pretty Valencia

09 de Diciembre de 2018



Índice

1. AGRADECIMIENTOS	3
2. INTRODUCCIÓN	4
3. METODOLOGÍA	6
3.1. Rutas y medios de transporte	6
3.2. Estandarización de la medición	7
3.3. Selección de rutas	7
3.4. Medición de las rutas críticas	7
3.5. Análisis estadístico	7
3.6. Mapa de concentración	8
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	9
5. ESTRATEGIAS DE MITIGACIÓN	19
6. Conclusiones	21
A. ANEXOS	23
A.1. Anexo 1 : Preselección de rutas	23

1. AGRADECIMIENTOS

A las entidades organizadoras Gases de Occidente (GDO), Promigas, Centro de Investigación e Innovación de Energía y Gas(CIEG) y Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente(DAGMA) por la creación del proyecto CALI RESPIRA, y su compromiso con el estudio de calidad del aire en el Valle del Cauca.

A la Pontificia Universidad Javeriana Cali, por su compromiso de divulgación y participación en este tipo de iniciativas a la comunidad universitaria.

Al Ms. Daniel Enrique Gonzáles, profesor de la Pontificia Universidad Javeriana Cali por su colaboración en conocimientos sobre tratamiento y análisis de datos.

2. INTRODUCCIÓN

El aire que respiramos contiene una matriz compleja, compuesta en casi el 99% por oxígeno y nitrógeno. El 1% restante la constituyen otras sustancias químicas que incluyen el dióxido de carbono, argón, neón, helio, hidrógeno, vapor de agua, material particulado entre otros gases. El desbalance de este 1% de la composición del aire representa una amenaza para la integridad de las condiciones en la salud humana y en los ecosistemas presentes, definiendo en sí la calidad del aire, y a saber si el mismo está o no contaminado.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha incluido la contaminación del aire entre los factores más determinantes para la salud pública [1]. Se ha reportado que, la contaminación del mismo, en particular por gases de efecto de invernadero y por material micro particulado, afecta a 9 de cada 10 personas y causa la muerte prematura de más de 7 millones de personas al año en todo el mundo, siendo responsable de varias afecciones crónicas, como enfermedades cardiovasculares, asma, y otras enfermedades pulmonares que incluyen cáncer y neumonías con cuadros graves en sus diagnósticos [2, 3] las personas de la tercera edad y los niños, son la población más afectada por esta contaminación en el aire [4]. De hecho, estos últimos tienen más probabilidades de desarrollar resultados adversos para la salud, ya que respiran mayores volúmenes de aire que los adultos en relación con su peso corporal y debido a que sus órganos, tejidos y sistema inmunitario están en fase de desarrollo y adaptación al medio ambiente [5].

Además, durante la última década, diversos estudios han demostrado que casi el 30% del tiempo diario pasa en algún sistema de transporte, incluidos transportes masivos, carros particulares o privados, bicicleta o como peatones [6]. Debido a esto, diversas ciudades del mundo llevan mediciones sobre la calidad del aire en diferentes espacios, para emitir información a la ciudadanía sobre considerar o no la exposición en espacios abiertos, es así que, en ciudades como Beijing o México D.F., y recientemente en Medellín y Bogotá, se alerta a los ciudadanos de tomar medidas para no realizar actividades deportivas al aire libre si algunas condiciones del medio ambiente no están dadas para esto [7]. Uno de los indicadores representativos para determinar la calidad del aire es el material particulado de diferentes tamaños (PM10 y PM2.5) [2].

Las distinciones entre PM2.5 y PM10, se encuentra relacionado con la exposición directa a partículas que poseen un tamaño de partícula máximo de 2.5 μm , para el primero o de 10 μm de diámetro para el segundo [4]. La composición química del PM2.5 es variada y puede estar constituida por especies químicas que individualmente constituyen más del 1% de la masa total de PM. Incluyendo algunos metales (Al, Si, Fe, K, Ca), los principales aniones (cloruro, nitrato, sulfato y carbonato) y cationes (sodio, amonio, potasio, magnesio y calcio), carbono elemental, carbono orgánico, hollín, polvo, minerales y agua, entre otros [8]. Todos estos compuestos pueden atravesar la barrera pulmonar e ingresar al

sistema sanguíneo provocando afecciones cerebrovasculares (58 %), neumopatías (18 %) y cáncer de pulmón (6 %) [2, 3]. Dependiendo de la naturaleza química del PM2.5, estas afecciones pueden ser más o menos críticas. Existen diferentes fuentes del PM2.5, que han sido categorizadas según el perfil de las emisiones, entre las fuentes de emisión de PM2.5 se ha identificado la combustión incompleta de combustibles derivados del petróleo (gasolinas, Diesel, carbón, etc) tanto en el tráfico cotidiano, como en el hogar, además, de los diferentes tipos de chimeneas en diversos tipos de industria, también se han identificado algunas fuentes naturales como el polvo del suelo, y otras posibles fuentes de origen humano no específicas [2].

Las mediciones de calidad del aire se notifican como concentraciones diarias de PM2.5 y se expresan en unidades de $\mu\text{g}/\text{m}^3$ por medio de equipos sensibles que perciben las concentraciones de estas partículas finas. La OMS recomienda un valor máximo de exposición diaria a PM2.5 de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$, sin que este represente un riesgo para la salud. La norma Colombiana es un poco más flexible en esta recomendación y según la resolución 2254 del 2017, del ministerio de ambiente y desarrollo sostenible (MADS) establece a partir del año 2018 el nivel máximo permisible de $37 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM2.5 en un tiempo de 24 horas.

Por todo lo anterior, en diferentes ciudades del mundo se llevan a cabo estudios sobre la acumulación de PM, para evaluar, analizar y proponer medidas preventivas. En Cali-Colombia, entidades como Gases de Occidente (GDO), el Centro de Investigación e Innovación en Energía y Gas (CIIEG), han lanzado iniciativas que impulsan a la creación de estrategias novedosas, que ayuden a la identificación de zonas que presenten una elevada concentración de PM2.5. Además, Cali cuenta con un Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire (SV-CAC) coordinado por el Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente (DAGMA), encargado de medir continuamente los contaminantes del aire en distintos puntos de la ciudad, presentando reportes diarios desde cada una de las estaciones fijas. Esta red de monitoreo cuenta con nueve estaciones fijas, pero solo tres de estas estaciones miden concentraciones de PM2.5, donde una estación está establecida en el campus de la Universidad del Valle.

El presente trabajo se realizó en el marco del proyecto CALI RESPIRA, que tiene como objetivo investigar la exposición de la población a los contaminantes como PM2.5, dependiendo del medio de transporte utilizado para realizar sus actividades diarias. Aquí se presentan mediciones de PM2.5 en cuatro rutas ubicadas en el área urbana de la ciudad de Cali, Colombia. Para la medición del PM2.5 se utilizaron equipos AIRBEAM, suministrados por los patrocinadores del proyecto CALI RESPIRA. Además, los resultados se discuten en función de las directrices de la OMS y el MADS para la calidad del aire.

3. METODOLOGÍA

Este trabajo se enfocó en establecer puntos críticos de movilidad, donde se identifica una población objetivo conformada por la comunidad estudiantil (0-25 años) y profesionales ligados a la educación tanto de universidades como de colegios, y al personal administrativo (docentes y colaboradores) de estas instituciones. Los mapas de concentración develan la exposición de las personas a PM2.5 con respecto a sus recorridos diarios, teniendo en cuenta el tipo de transporte utilizado (Transporte público masivo (MIO), transporte público tradicional (bus), carro, moto, bicicleta, o peatonal), y las poblaciones más afectadas directamente por este contaminante.

Con la información compilada se identificaron rutas críticas de exposición personal a PM2.5, incluyendo factores como el medio de transporte utilizado y la hora de la exposición. Los datos recopilados se graficaron en el software ORIGIN 9.0, y fueron tratados estadísticamente con el software Rstudio 3.6.1, y los mapas de concentración de PM2.5 fueron realizados con ArcGIS 10.4. Por otro lado, se identificaron puntos críticos dentro del recorrido de las dos rutas seleccionadas. Los puntos críticos corresponden a sitios específicos de las rutas, donde posiblemente existe una mayor emisión y acumulación de PM2.5, ya sea por fuentes móviles o construcciones viales o residenciales. Además, estos puntos permiten obtener un contexto específico del entorno y contribuyen a la generación de estrategias de reducción de PM2.5.

3.1. Rutas y medios de transporte

Para la selección de las rutas se tuvo en cuenta el sector poblacional sobre el cual está enfocado el estudio, así como la intersección entre las rutas donde se presenten puntos de convergencia y la afluencia de la población. La estación del servicio de transporte MIO “Universidades”, representa un punto de alta densidad demográfica debido a su posición estratégica y en donde convergen las rutas de buses alimentadores, que distribuyen a la población civil a diferentes centros de educación, tanto primaria como secundaria y/o universitaria. Además, esta estación es eje para que las personas lleguen a sus trabajos en el sur de la ciudad. A partir de este punto se escogieron cuatro posibles rutas piloto, para evaluar la concentración de PM2.5 y, con el fin de optimizar el estudio de estas cuatro rutas se escogieron dos rutas críticas y puntos clave para la medición del mismo.

Las cuatro rutas iniciales fueron escogidas en base a una encuesta online dirigida a la comunidad universitaria de las comunas 17 y 22, para determinar cuáles son los recorridos más frecuentes entre estudiantes y trabajadores de distintas universidades. Por otro lado, también se incluyó en la encuesta el tipo de transporte empleado y su destino (Anexo 1). Algunos de los criterios tomados en cuenta para establecer los recorridos generales fueron: rutas con alto tráfico vehicular (MIO, vehículos particulares, busetas y motos); vías con ciclorrutas integradas; alta densidad peatonal; rutas de convergencia para la comunidad

estudiantil y la presencia de población con mayor grado de vulnerabilidad a exposiciones de PM2.5 como estudiantes de colegios en sus primeros años escolares. Los resultados de la encuesta permitieron identificar que las rutas de mayor concurrencia por parte de la comunidad estudiantil son: Simón Bolívar con Panamericana (47.6%), calle 5 con Cañasgordas (31%) y la Avenida Pasoancho con Cañasgordas (11,9%). En base a estos resultados recopilados por la encuesta, se preseleccionaron 4 rutas (Ruta A - Cañasgordas ; Ruta B Panamericana; Ruta C - Simón Bolívar y Ruta D - Univalle) donde se hizo la medición de PM2.5.

3.2. Estandarización de la medición

Antes de ejecutar las mediciones en las rutas mencionadas anteriormente, se realizó una medición de prueba, mediante un recorrido en la comuna 22, con el fin de establecer un protocolo de trabajo y que los equipos de medición AIRBEAM registraran de la misma forma los datos de PM2.5. Se ejecutaron al mismo tiempo los cinco sensores bajo las mismas condiciones ambientales, en tales condiciones, los resultados fueron comparables para los cinco sensores.

3.3. Selección de rutas

Se analizaron estadísticamente los valores de PM2.5, medidas de forma peatonal en las cuatro rutas seleccionadas previamente con la encuesta, las distancias promedio para cada ruta fueron de 2.25 Km para la ruta A; 3.1 Km para la ruta B; 2.4 Km para la ruta C y 2.1 Km para la ruta D Figura 1. Los resultados permitieron identificar dos rutas que presentaron mayor concentración de PM2.5. Las rutas elegidas fueron identificadas como A y B. La primera comprende el tramo entre la estación “universidades” y la Pontificia Universidad Javeriana (PUJ) y la ruta B, parte desde el barrio Bochalema con destino a la PUJ, pasando por la vía Simón Bolívar.

3.4. Medición de las rutas críticas

Se realizó la medición de PM2.5, durante cinco semanas, en días hábiles (alta congestión vehicular(lunes a sábado)) y días no hábiles (baja congestión vehicular (domingos o festivos)), para comparar el nivel de exposición entre el día hábil vs el día no hábil. La medición del PM2.5 fue realizado en los diferentes medios de transporte durante las horas pico (6:00-10:00 am y 4:00-9:00 pm).

3.5. Análisis estadístico

Las concentraciones de PM2.5 medidas por el sensor Airbeam, en la aplicación AirCasting, fueron tratadas y analizadas con el paquete estadístico descriptivo del programa Rstudio. La presentación gráfica de los resultados fue realizada con el programa Origin y ArcGIS para la construcción de las rutas

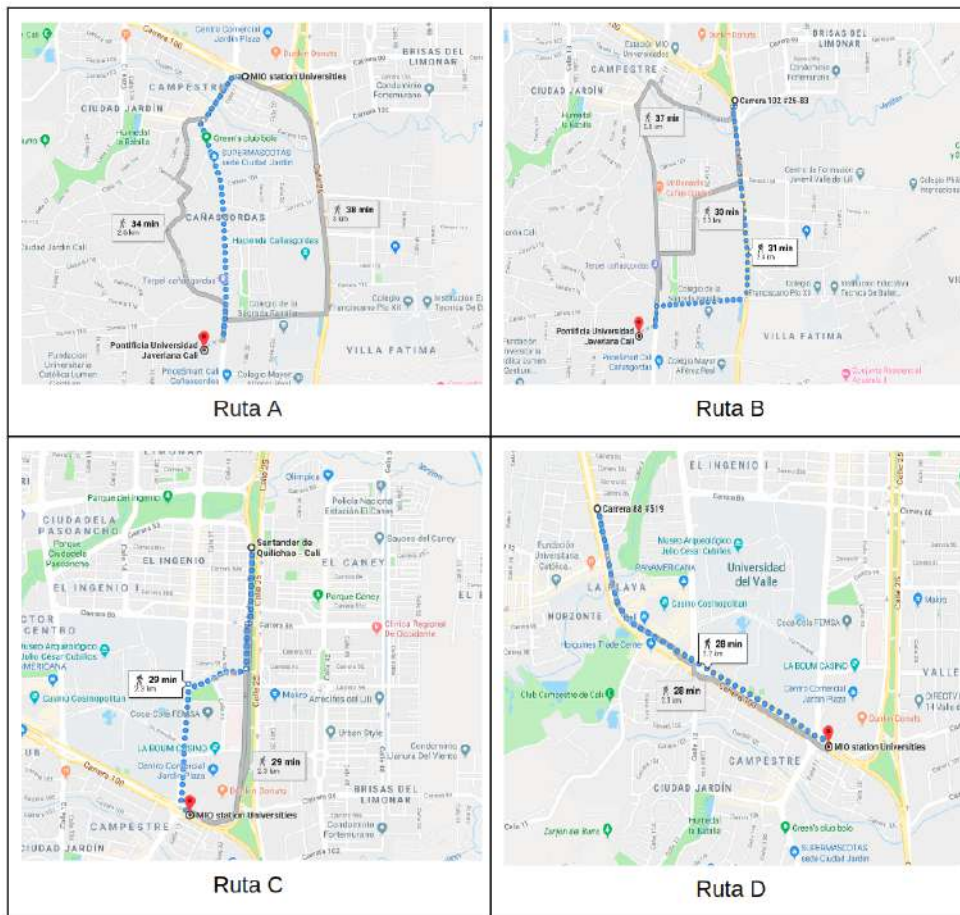


Figura 1: Recorridos piloto para la identificación y determinación de material particulado PM2.5 en la ciudad de Cali

geográficos estudiadas.

Para el tratamiento de los datos, fue necesaria la normalización de estos con respecto a la distancia recorrida en la ruta correspondiente. Además, se compararon los resultados obtenidos por el sensor Airbeam con la estación de red de monitoreo de calidad del aire ubicada en la Universidad del Valle.

3.6. Mapa de concentración

Como métrica final, se condensaron los datos de PM2.5 en cada una de las ruta y por cada medio de transporte, teniendo en cuenta algunos de los días

más relevantes. forma que se pudieran mostrar en mapas de concentración de exposición y de riesgo, esto se realizó con la ayuda del software ArcGIS.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se trabajó con un total de 51 mediciones, donde el 42 % fueron hechas de forma peatonal, el 15,5 % en motocicleta, el 15 % en transporte público tradicional, el 13 % en transporte masivo (MIO), el 7,5 % en carro y el 7 % en bicicleta. Sin embargo, para el análisis estadístico y construcción de mapas de concentración sólo se consideraron los medios de transporte peatonal, motocicleta, transporte público tradicional, transporte masivo y carro, ya que se presentaron fallas en el contenido de datos que arrojaron algunos sensores en la medición con medio de transporte bicicleta. Con el objetivo de determinar cuáles de las rutas presentan una mayor concentración de material particulado, se realizaron mediciones de PM2.5 caminando en los diferentes recorridos como se muestra en la Figura 2.

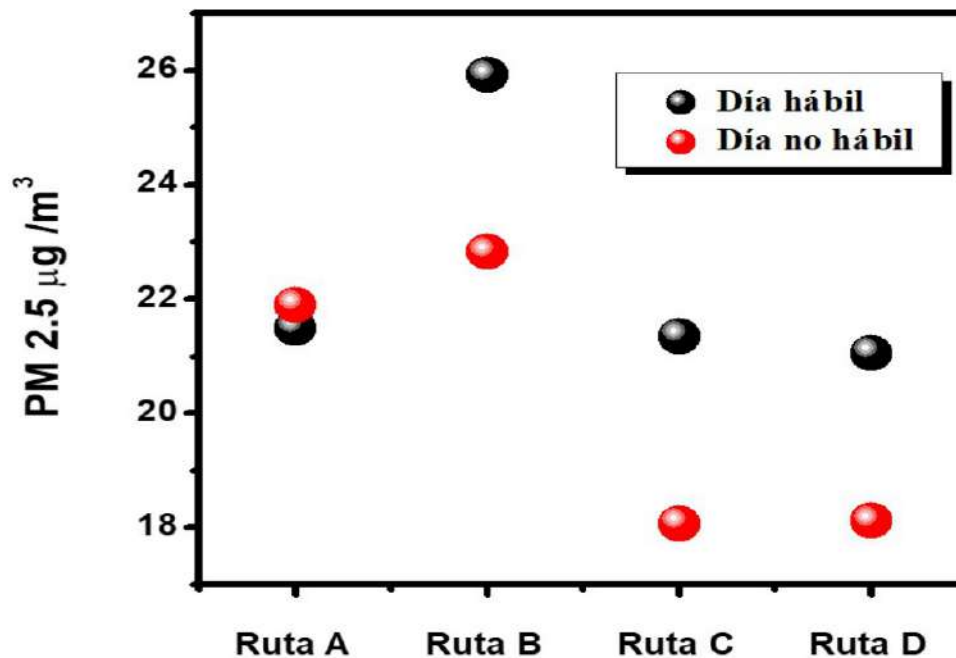


Figura 2: Promedio de exposición a PM2.5 vs Ruta en días hábiles y no hábiles, en el horario de hora pico de la mañana.

La figura 2, muestra los valores promedios de concentración de PM2.5 medidos en cada ruta. En esta figura se puede apreciar que la concentración promedio para días hábiles en las rutas A ($21,50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y B ($25,92 \mu\text{g}/\text{m}^3$), son mayores

que en las rutas C ($21.35 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y D ($21.06 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Además, se puede observar que para los días no hábiles, las concentraciones de PM2.5 disminuyen para las rutas B ($22.83 \mu\text{g}/\text{m}^3$), C ($18.07 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y D ($18.12 \mu\text{g}/\text{m}^3$), mientras que para la ruta A, el valor es similar ($21.09 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Esto puede deberse a la congestión vehicular que se presenta en la glorieta de Ciudad Jardín, producto de los flujos poblacionales no variantes en estos días. Mientras las otras rutas los flujos vehiculares disminuyen significativamente. De acuerdo con los resultados presentados en la figura 3, el estudio de PM2.5, se orientó a las rutas A y B en días hábiles.

En la Figura 3, presenta la medición de PM2.5 de la ruta A, teniendo como punto cero, la estación de universidades y como punto final la PUJ, en la misma se pueden apreciar los límites de PM2.5 establecidos por la OMS ($25 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y el MADS ($37 \mu\text{g}/\text{m}^3$) para un valor de exposición de material particulado promedio diario, podemos ver en esta figura, franjas de color correspondientes a la calidad del aire, de acuerdo al MADS, en verde cuando la calidad del aire es buena ($0-12 \mu\text{g}/\text{m}^3$), amarillo cuando es aceptable ($13-37 \mu\text{g}/\text{m}^3$), naranja cuando la calidad del aire es dañino a la salud de grupos sensibles ($38-55 \mu\text{g}/\text{m}^3$), rojo hace referencia a una calidad de aire dañina para la salud ($56-150 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Se alcanzó un registro máximo de $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ que. Valores superiores a $150 \text{g}/\text{m}^3$ son representados por colores púrpura y marrón para aires que son muy dañinos y peligrosos para la salud (MADS, 2017).

La figura 3, muestra que el transporte público tradicional presenta una menor concentración de PM2.5, con respecto a los otros medios de transporte (moto y peatonal). Además, se aprecia que los picos de concentración más elevados de PM2.5 se presentan para el uso de la moto como medio de transporte. Cuando la medición de PM2.5 se realizó de forma peatonal, se encontró una medición de alrededor de los 300 m, donde se disparó el valor de la concentración a $76 \text{g}/\text{m}^3$.

Este valor se registra como de calidad del aire dañina para la salud, se puede mencionar que esta medida se realizó en un tramo del recorrido, donde la medición del PM2.5 estuvo más cerca de las avenidas, debido a la ausencia de espacio peatonal para caminar, lo que posiblemente pueda explicar este pico, por una exposición directa a exhostos de automóviles y buses.

Además, se aprecia altos niveles alrededor de los 600 metros de recorrido, tanto para los registros en moto como el recorrido modo peatonal, a esta distancia la calidad del aire puede asumirse como dañina para la salud, según la franja de colores mostrados, cabe mencionar que a esta distancia se ubica la glorieta de ciudad Jardín, que representa un punto de represamiento del tráfico en la avenida Cañasgordas, sirviendo de intersección de esta y otras avenidas,

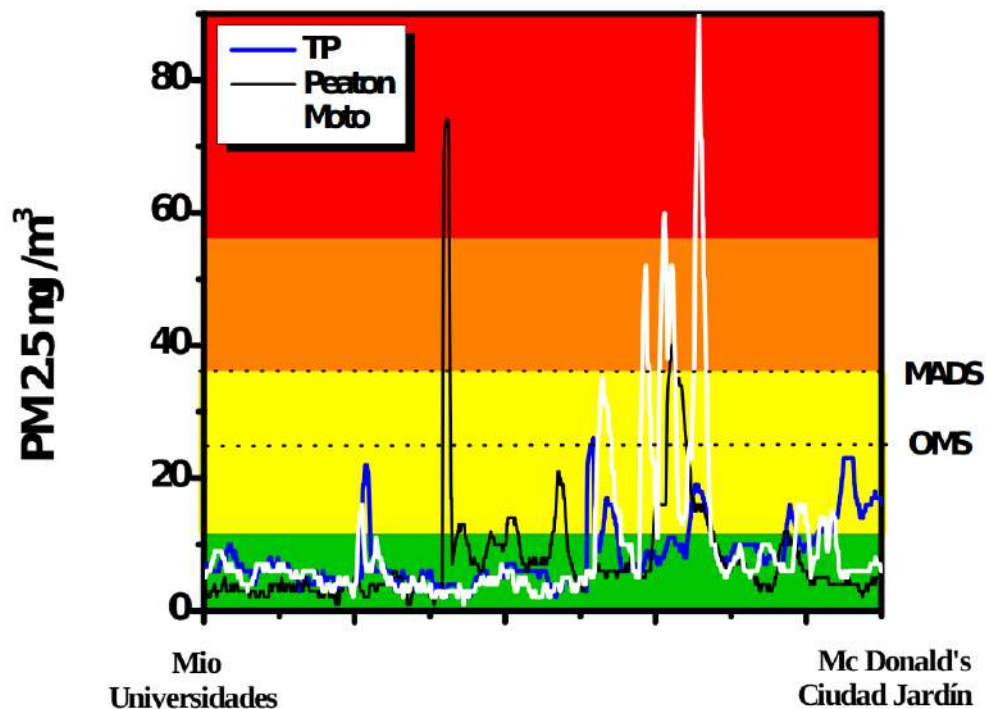


Figura 3: Concentración de material particulado PM2.5 en distintos medios de transporte en el recorrido de la Ruta A en día hábil, donde TP es transporte público tradicional (recreativos y ermita) ,se presenta en líneas punteadas los valores máximos permisibles para la calidad del aire por la OMS ($25 \mu g/m^3$) y el MADS ($37 \mu g/m^3$).

y por ende, en este punto se puede presentar una alta exposición a material particulado sobre las personas que transitan esta zona.

Por lo anterior, solo se hizo énfasis en parte de la ruta A, ya que en esta zona se presentaron niveles de concentración de PM2.5 superiores a los recomendados por la OMS y el MADS. Estos resultados son concordantes con los expuestos en la figura 2, donde se mencionó que el promedio del material particulado 2.5 en un día hábil sobre esta ruta no difiere significativamente de un día no hábil.

Por otro lado, la Figura 4 muestra la medición de concentración PM2.5 realizados de forma peatonal, desde la Pontificia Universidad Javeriana (PUJ) hacia la estación de universidades en un día no hábil.

Esta figura muestra que durante casi todo el recorrido los niveles de PM2.5 son inferiores a los recomendados por la OMS y el MADS, correspondientes a una buena calidad del aire, debido a que en los días no hábiles, existe una dismi-

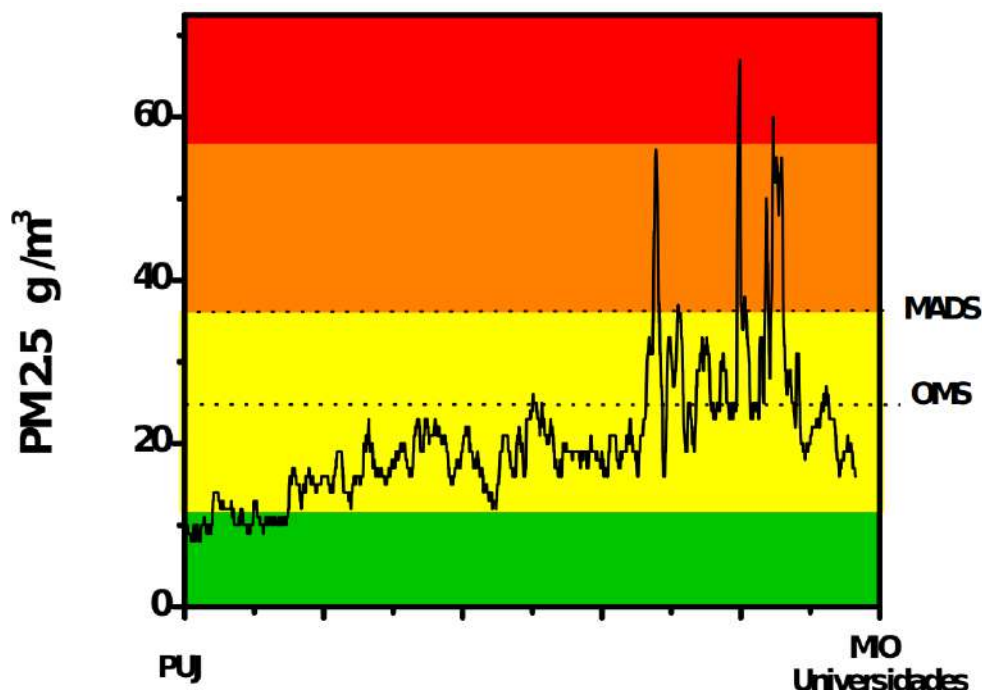


Figura 4: Concentración de material particulado PM2.5 de forma peatonal, recorrido de la Ruta A en día no hábil. También se presenta en líneas punteadas los valores máximos permisibles para la calidad del aire por la OMS y el MADS.

nación significativa del flujo de transporte. Sin embargo, se puede apreciar en la figura 5 registros superiores a $37 \mu\text{g}/\text{m}^3$, estos valores fueron medidos alrededor de la glorieta de ciudad Jardín, lo que complementa la apreciación inicial sobre valores altos de PM2.5 en esta zona de la ciudad. Los resultados aquí mostrados son congruentes con los datos recopilados en las diferentes mediciones tanto en días hábiles como en días no hábiles, identificando un punto crítico en el recorrido de esta ruta A en la ciudad. Por lo que esta zona no goza de una calidad de aire significativamente buena en el tiempo que se realizó la medición.

Para la ruta B, en la Figura 5 se muestra el nivel de exposición de PM2.5 en tres modos de transporte distintos (peatonal, moto y transporte público tradicional (MIO)). Las mediciones inician desde el punto cero en Parques de la Bocha (barrio Bochalema) y como punto final la PUJ. Además, aquí se puede observar en líneas punteadas los límites de PM2.5 establecidos por la OMS y el MADS.

Se encontraron diferencias de la concentración de PM 2.5 entre los diferentes

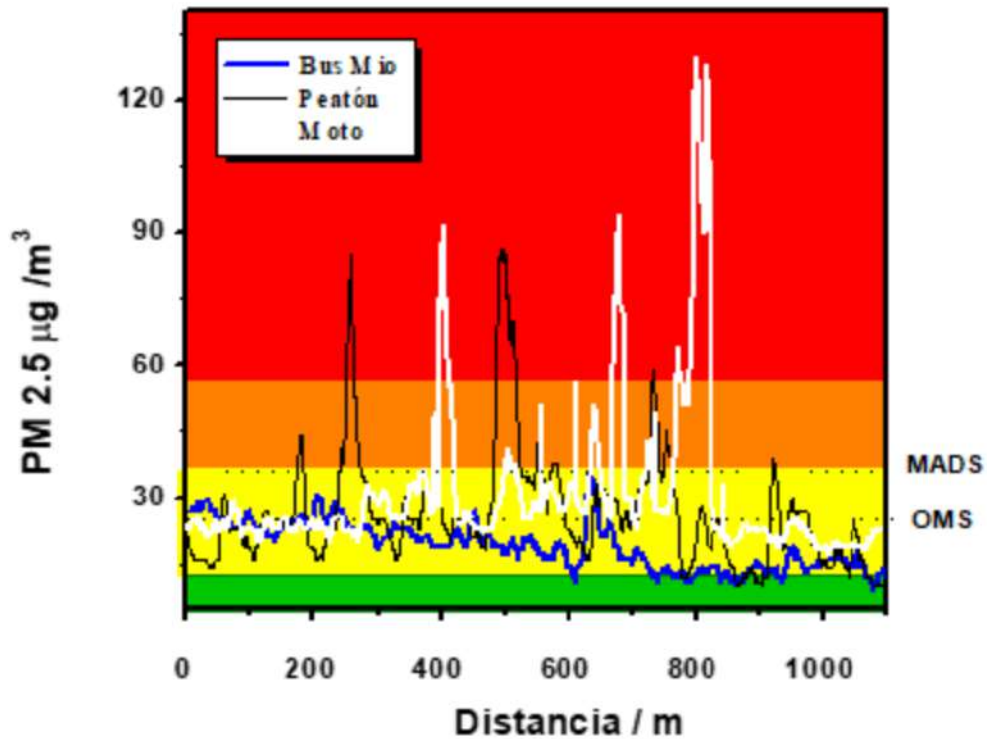


Figura 5: Concentración de material particulado PM_{2.5} en distintos medios de transporte en el recorrido de la Ruta B en día hábil. Se presenta en líneas punteadas los valores máximos permisibles para la calidad del aire por la OMS y el MADS.

medios de transporte en la ruta B. La figura 5, muestra que el transporte público masivo (MIO) presenta concentraciones con poca variabilidad de PM_{2.5} con respecto a los otros medios de transporte (moto y peatonal). Esto podría explicarse dado a que el transporte masivo es completamente cerrado y posee aire acondicionado, lo que podría filtrar y disminuir las concentraciones de PM_{2.5} en su interior. Además, se aprecia que los picos de concentración más elevados para motocicleta y peatón como modos de transporte, los cuales superan considerablemente las directrices recomendadas por la OMS y el MADS. Esto posiblemente está dado por una exposición más directa a las construcciones viales que se adelantan en la calle 125 que iniciaron a principios de 2019, además el aumento de la congestión vehicular, puesto que esta es una avenida nacional y una de las principales entradas para la ciudad de cali. Asimismo, se observó un mayor número de vehículos de carga pesada como mulas y buses de viaje, lo cual puede ser un factor influyente en el aumento de las concentraciones de

PM2.5.

La figura 3 y la figura 5, muestran que la exposición a PM2.5, cuando el medio de transporte utilizado es la moto es mayor que con respecto a los otros medios de transporte, esto puede ser debido a la exposición del motociclista en un ambiente abierto con respecto al ambiente cerrado que tienen las personas en los transportes masivos, puesto que al estar inmerso en el tráfico presenta una exposición directa a diversas fuentes de emisión de material particulado. Para garantizar condiciones atmosféricas similares en la determinación de PM2.5, los datos de las figuras 2, 3 y 5 fueron tomados en el mismo día, y en el rango de tiempo de hora pico, con el fin de tener homogeneidad parcial de los datos, de otro lado las mediciones de PM2.5 para el día no hábil de las figuras 2 y 4 se realizaron en el mismo día no hábil y en la misma semana de las mediciones del día hábil. Esto evita la dispersión significativa de los muestreos en días con condiciones atmosféricas diferentes, el punto de comparación con el día no hábil, se hizo en la misma semana de estas mediciones. Sin embargo, cuando se realizaron estudios en otras semanas, en otros días pero en mismos rangos de tiempos, prevalece la heterogeneidad de las mediciones, por esto se construyeron mapas de concentración de PM2.5 para diferentes días de medición, diferentes medios de transporte y diferentes rutas de viaje (Figura 6 a 10).

Sobre lo mapas de concentración se hará énfasis en aquellos puntos que se consideran críticos para las dos rutas elegidas. Las figuras 6 a 10 muestran los mapas de concentración de PM2.5 para peatón, motocicleta, transporte público tradicional, transporte público masivo (MIO) y carro para las dos rutas empleadas. Estos mapas representan los recorridos matutinos de las mediciones. Para el caso de la ruta A fue totalmente uniforme, donde se observa en general que la calidad del aire es buena y en otros casos aceptable, cumpliendo los niveles máximos permisibles establecidos por el MADS. Por otro lado, para la ruta B existieron ciertas variaciones durante el recorrido en los distintos medios de transporte, como es el caso de la ruta empleada por el MIO, la cual difiere del recorrido general que sea realiza en motocicleta, carro e inclusive la forma peatonal. No obstante, a pesar de dichas variaciones en el recorrido de la ruta B, los resultados permitieron estimar e identificar parte de los posibles puntos críticos que se presentan a lo largo de este recorrido, ya que la gran mayoría de las altas concentraciones de PM2.5 se encuentran en la ruta B.

En la figura 7 se puede apreciar que en el modo de transporte motocicleta, existen unos puntos de color rojo y algunos púrpuras en los mapas D y E, estos se presentan cerca a los centros comerciales La 14 de valle de lili y Jardín plaza. Los rangos de contaminación de estos mapas representan un estado de la calidad del aire muy dañino para la salud, lo cual puede deberse al alto tráfico vehicular que se ha presentado por el cierre de algunos retornos en esta avenida, ocasionando el embotellamiento de los vehículos. Esto posiblemente podría causar la acumulación de este tipo de contaminante, provocando un registro de altos niveles de concentración. Por otro lado, este punto crítico coincide con la

medición en carro del 20 de Noviembre sobre la misma ruta (Figura 10), además a esto se suma un megaproyecto para la ampliación de la vía Cali-Jamundí, lo cual puede generar aumentos significativos en la concentración de PM 2.5 (Diario Occidente, 2019).

Por otro lado, en la medición de manera peatonal sobre la ruta B se presenta un zona marcada en rojo, este día se presentó un alto flujo vehicular, además en esta zona la avenida no cuenta con ciclorrutas integradas o andenes, por lo cual la medición se realizó muy cerca a las fuentes de contaminación en este punto específico del trayecto (Figura 6, mapa A). Además, para este mismo modo de transporte en la ruta A se observan niveles de calidad del aire dentro de los rangos permisibles, cabe resaltar que esta avenida cuenta con un sistema de cicloruta integrado durante todo el trayecto (Figura 6 mapas B,C y D).

La figura 8, muestra los resultados del recorrido de la ruta A para el nivel de exposición de PM2.5 en transporte público tradicional. Solo se hizo este recorrido para la ruta A, dado que no se presta un servicio de transporte tradicional por la ruta B que favorezca a la comunidad estudiantil pertenecientes a Universidades como la Javeriana o ICESI. Sin embargo, para este caso fue posible realizar mediciones durante horas pico (mapas A B, E, F y G) y horas valle (mapas C, D, H e I). Aunque la gran mayoría de los registros para ambos horarios corresponden a rangos buenos y aceptables para la OMS y el MADS, es posible apreciar que existe una ligera diferencia entre dichos horarios, ya que en gran parte de los mapas para horas pico las concentraciones están en amarillo (valores entre 12 y $37 \mu g/m^3$) y para las horas valle, gran parte de los registros se encuentran en verde (0 a $12 \mu g/m^3$), esto se puede deber a la disminución del tráfico durante estas horas. Ahora bien, cabe mencionar que para algunas de las mediciones realizadas se presentaron fallas en los datos arrojados por el sensor airbeam, donde algunos de los puntos aparecían fuera la zona de medición o se perdía información de estos (Figura 7 mapa A y Figura 9)



Figura 6: Mapa de concentración de PM_{2.5} en las dos rutas críticas, mediante el modo de transporte peatonal. El mapa A corresponden a la ruta B; los mapas B,C y D corresponde a la ruta A.

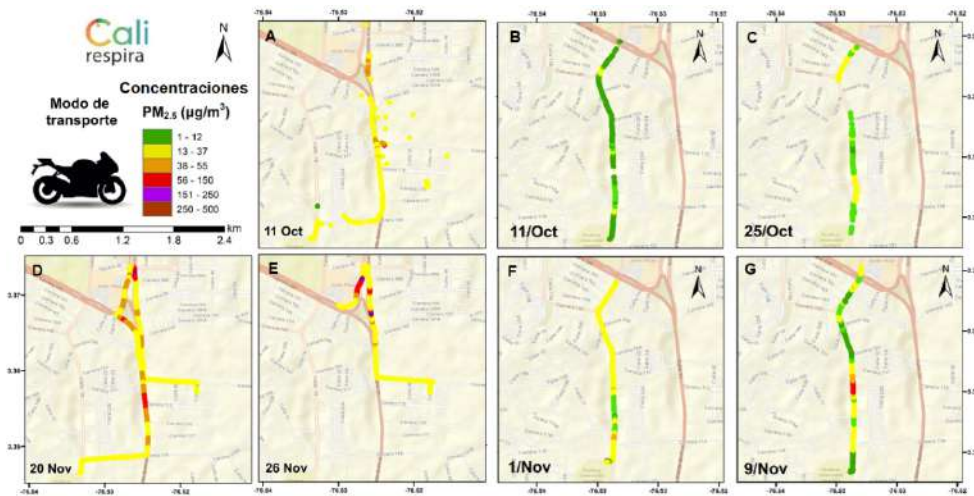


Figura 7: Mapa de concentración de PM_{2.5} en las dos rutas críticas, mediante el modo de transporte peatonal. Los mapas B, C, F y G corresponde a la ruta B; los mapas A, D y E corresponden a la ruta A.

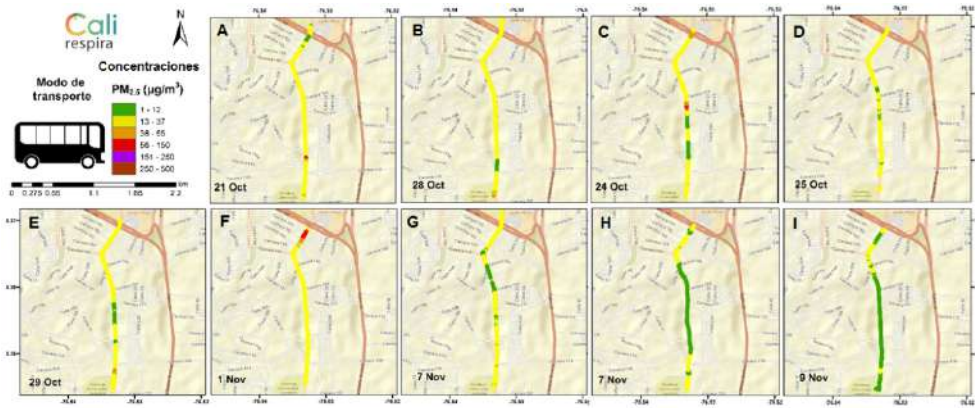


Figura 8: Mapa de concentración de PM_{2.5} en transporte público tradicional (recreativo) sobre la ruta A. Los mapas A, B, E, F y G corresponden a recorridos durante el día en horas pico; los mapas C, D, H e I corresponden a recorridos nocturnos, posteriores a las 21:00 horas.

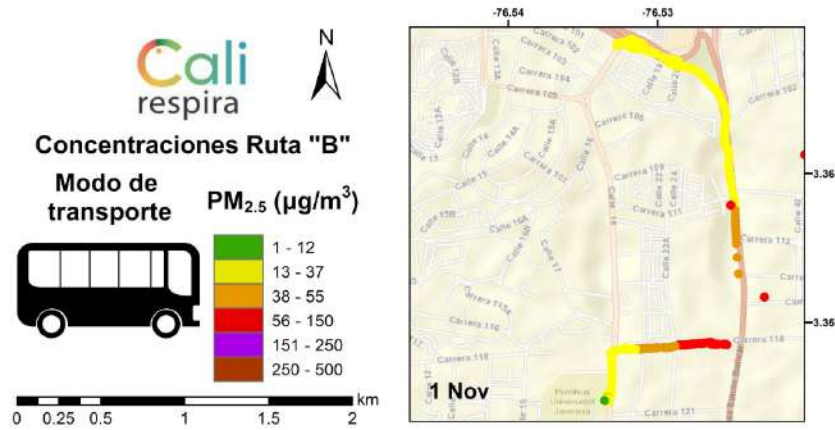


Figura 9: Mapa de concentración de PM_{2.5} en transporte público masivo (MIO) sobre la ruta B.

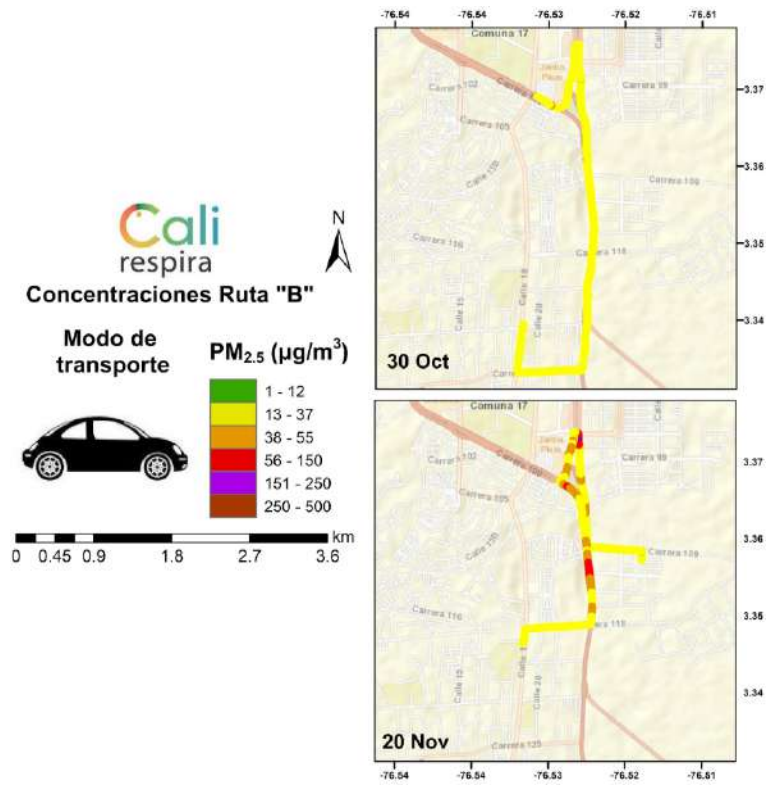


Figura 10: Mapa de concentración de PM_{2.5} mediante carro (MIO) sobre la ruta B.

5. ESTRATEGIAS DE MITIGACIÓN

Como se ha notado en el desarrollo del proyecto y de acuerdo a las diferentes conclusiones alrededor de la exposición personal de pm2.5 en las distintas rutas, se deben considerar estrategias las cuales ayudan a la mitigación del material particulado en el ambiente.

En la ciudad de Cali, entidades como Gases de Occidente(GDO), en conjunto con la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca(CVC), el Departamento administrativo de gestión del medio ambiente(DAGMA), trabajan en estrategias las cuales ayudan a la disminución de la contaminación del medio ambiente en la ciudad. Estrategias como “La Vida va en Bici” [9], incentivan los medios de transporte de cero emisiones.

Como resumen, las estrategias de mitigación que se podrían implementar en la ciudad de Cali se basan en tres focos:

- **Conversión de combustibles:** En vista de que la mayoría de los medios de transporte funcionan a base de combustible diesel y contando con que este tipo de energía aporta 3 veces más la carga contaminante a la atmósfera que los otros combustibles (electricidad, gas y biocombustibles)[10], una de las estrategias que se están llevando a cabo es el cambio paulatino de la flota de Buses de transporte masivo MIO, por vehículos a base de gas natural, ya que estos emiten un porcentaje considerablemente menor de material particulado al aire.
- **Uso de filtros:** Pensando en las fuentes directas de los contaminantes, una posible estrategia para reducir la emisión puede ser el uso reglamentado de filtros que retengan este tipo de material particulado nocivo para la salud humana. Esto combatiría de frente aquellos tipos de automotores y otras fuentes contaminantes que arrojan grandes cantidades de material particulado por diversos motivos tales como desgaste, antigüedad y/o presencia de anomalías en el proceso de combustión.
- **Planificación urbana:** La planificación urbana puede ser una forma de preparación a distintas situaciones resultantes de vivir en conjunto. Tener una buena malla vial para vehículos automotores esto puede ayudar a disminuir las acumulaciones de estos, y por ende haya una mayor fluidez que permita eludir mayores concentraciones de diferentes contaminantes en ciertos puntos. Ciclorutas y calles peatonales son formas de incentivar a las personas a utilizar medios o modos de transporte 100 % amigables con el medio ambiente además de obtener beneficios para la salud. Por último, y no menos importante, está implementación parques y zonas verdes las cuales ayudan a regular la contaminación en el medio y brindan espacios

para compartir, entretener y acercar a la población a espacios naturales promoviendo la importancia de estos para la supervivencia y el beneficio humano en cuanto a calidad del aire y otros beneficios.

6. Conclusiones

A lo largo de los recorridos de las dos rutas, fue posible determinar algunos puntos críticos. Para la ruta A se identificó el punto crítico localizado por la glorieta de Ciudad Jardín y para la ruta B, se identificaron puntos críticos cerca al centro comercial Jardín Plaza y la 14 del Lili en la comuna 17. Estos puntos críticos corresponden a zonas específicas con alto flujo vehicular, represamiento vehicular y construcciones viales principalmente.

Dados los resultados de la primera medición fue posible estimar diferencias significativas entre días hábiles y no hábiles en casi todas las rutas preseleccionadas, ya que los valores de las concentraciones de PM2.5 disminuyen notablemente para los días no hábiles.

Para las rutas críticas seleccionadas (A y B), el medio de transporte motocicleta muestra los índices más altos de concentración de PM2.5 durante la realización de las mediciones inclusive pasando los niveles de las normativas de la OMS y MADS, creando un foco de atención sobre las dinámicas del entorno del motociclista al realizar sus respectivos desplazamientos. Estas dinámicas pueden estar asociadas a su inmersión dentro del flujo vehicular y características físicas de cubrimiento, ya que a comparación del transporte público no presenta ventanas que puedan simular un medio parcial o completamente cerrado.

Asimismo, se plantea que alguna de estas diferencias pueden explicarse a otros factores como el tipo de exposición es decir si está en un ambiente abierto o cerrado, esto hace referencia si es un espacio sin limitaciones donde se tiene un contacto directo con las fuentes de contaminación como es el caso del tipo de transporte peatón o motocicleta, mientras que en un ambiente cerrado hace referencia a la limitación por barreras físicas por ejemplo, el uso de transporte masivo como el mío el cual mantiene sus ventanas cerradas.

Por lo tanto, el estudio presentado sirve como un primer acercamiento para futuras investigaciones más detalladas sobre la concentración de PM2.5. Por otro lado, este estudio sirve como un primer acercamiento para establecer diferencias en las concentraciones de PM2.5 en diferentes modos de transporte bajo las condiciones de la comuna 17 y 22 de la ciudad de Cali, por lo cual se sugiere en futuros estudios incluir variables que no fueron consideradas en este estudio como rutas alternas, meteorológicas, climatológicas, velocidad del viento, espacio abiertos o cerrados, que pueden afectar directa o indirectamente las mediciones de concentración de PM2.5 y que pueden facilitar y mejorar la eficiencia y exactitud del trabajo.

Referencias

- [1] M. Jaramillo, D. E. González, M. E. Núñez, and G. Portilla, “Índice integrado de calidad del aire para ciudades colombianas,” *Revista Facultad de Ingeniería*, no. 48, pp. 97–106, 2009.
- [2] “World health organization.” Disponible en: [<https://www.who.int/>]. En línea; Acceso: Septiembre 2019.
- [3] N. Rees, “Clear the air for children: the impact of air pollution on children.,” 2016.
- [4] N. Y. Rojas, “revisión de las emisiones de material particulado por la combustión de diesel y biodiesel,” *Revista de Ingeniería*, no. 20, pp. 58–68, 2004.
- [5] M. E. Thomason, B. E. Burrows, J. D. Gabrieli, and G. H. Glover, “Breath holding reveals differences in fmri bold signal in children and adults,” *Neuroimage*, vol. 25, no. 3, pp. 824–837, 2005.
- [6] E. Espectador, “¿cuántas horas al día gasta en el transporte público de bogotá?,” Feb 2019.
- [7] Semana, “Bogotá, vuelve el pico y placa extendido y el fin de semana por mala calidad del aire,” Mar 2019.
- [8] Z. Dagher, G. Garçon, P. Gosset, F. Ledoux, G. Surpateanu, D. Courcot, A. Aboukais, E. Puskaric, and P. Shirali, “Pro-inflammatory effects of dunkerque city air pollution particulate matter 2.5 in human epithelial lung cells (1132) in culture,” *Journal of Applied Toxicology: An International Journal*, vol. 25, no. 2, pp. 166–175, 2005.
- [9] “El dagma le cuenta cómo va la estrategia de adaptación y mitigación al cambio climático en cali.” Disponible en: <https://www.cali.gov.co/dagma/publicaciones/141422/el-dagma-le-cuenta-como-va-la-estrategia-de-adaptacion-y-mitigacion-al-cambio-climatico-en-cali/>.
- [10] A. Corredor, D. Melisa, *et al.*, “Emisiones de material particulado de los vehículos en bogotá. estrategias de gestión ambiental para su mitigación,”

A. ANEXOS

A.1. Anexo 1 : Preselección de rutas

La encuesta dirigida a la comunidad universitaria pertenecientes a las comunas 17 y 22 de la ciudad de Cali, permitieron determinar cuáles son las rutas más comunes y concurridas entre estudiantes y trabajadores de distintas instituciones (Figura 11).

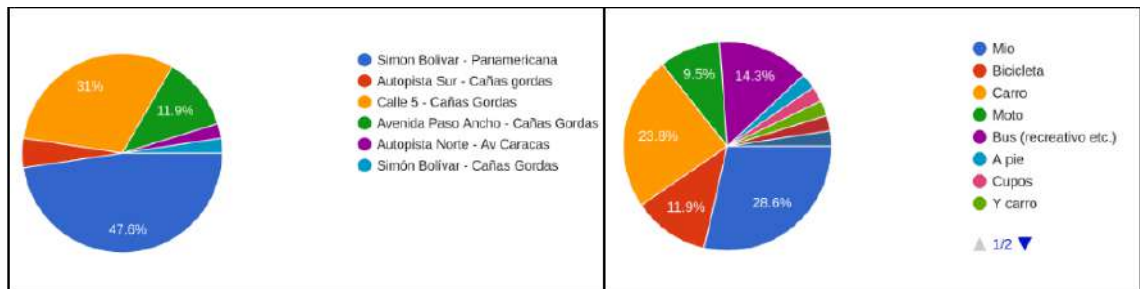


Figura 11: Encuestas realizadas a la comunidad estudiantil y de trabajadores de diferentes universidades (Univalle, Autónoma de Occidente, Javeriana, ICESI) (n= 42). (A) Representa las avenidas y calles más usadas para llegar al lugar de destino y (B) representa el tipo de transporte utilizado. Consulte la encuesta en el siguiente link: <https://forms.gle/QCcbELfEmfByRkYY9>