



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **Exposición a contaminantes atmosféricos a nivel de calle: comparación en diferentes modos de transporte y con estrategias de disminución**

**Ing. Germán Andrés Cabrera Rojas**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental  
Bogotá, Colombia

2022

# **Exposición a contaminantes atmosféricos a nivel de calle: comparación en diferentes modos de transporte y con estrategias de disminución**

**Ing. Germán Andrés Cabrera Rojas**

Trabajo final de maestría presentado como requisito parcial para optar al título de:  
**Magíster en Ingeniería Ambiental**

Director:

Luis Carlos Belalcazar Cerón, Ph.D.

Línea de Investigación:

Modelación de la Calidad del Aire

Grupo de Investigación:

Grupo de Investigación en Calidad del Aire

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental

Bogotá, Colombia

2022

III Exposición a contaminantes atmosféricos a nivel de calle:  
comparación en diferentes modos de transporte y con estrategias de disminución

---

*A mi familia (a mi madre que ya no nos acompaña  
en este plano de vida) y a la sociedad*

*“Yo realicé a Dios a través de las Matemáticas”  
Dr. Serge Raynaud de la Ferrière y Dr. David Ferriz Olivares*

## **Declaración de obra original**

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

GACR

---

Ing. Germán Andrés Cabrera Rojas

Fecha 13/12/2022

## Agradecimientos

Especial agradecimiento al profesor Luis Carlos Belalcazar Cerón, mi tutor, por la gran paciencia y sabia dirección durante estos años; al Departamento de Ingeniería Química y Ambiental de la sede Bogotá de la Universidad Nacional de Colombia, al personal administrativo, docente y la comunidad universitaria que hacen posible la mejor universidad del país. Al Grupo de Investigación en Calidad del Aire del que somos parte, por la ayuda brindada en torno al corazón del presente trabajo de grado, el software de Dinámica Computacional de Fluidos (CFD, sigla en inglés) WinMiskam® (WM) y a la empresa alemana Lohmeyer por el soporte a través de Tilo Hoffmann. Gracias al Mag. José Agustín Zamudio Peña y al proyecto Bogotá Elekrika (BE) por el dominio y los datos facilitados para desarrollar el presente trabajo.

También muchas gracias a mi familia, a mi madre Elizabeth Rojas Santanilla que ya no nos acompaña en este plano de vida, a mi padre Pablo Germán Cabrera Salazar y a mi hermana Diana Paola Cabrera Rojas, por el apoyo incondicional. A la Fundación Magna Fraternitas Universalis por la inspiración en el servicio impersonal a la humanidad.

## Resumen

### **Exposición a contaminantes atmosféricos a nivel de calle: comparación en diferentes modos de transporte y con estrategias de disminución**

El estudio de la calidad del aire en la microescala es fundamental pues permite evaluar la exposición a los contaminantes además de la cuantificación de inventarios de emisiones. Dentro de los contaminantes más importantes conocidos como criterio se encuentran el material particulado inferior a 2,5 micrómetros ( $PM_{2.5}$ , sigla en inglés), los gases: óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ) y el monóxido de carbono (CO) a los cuales este trabajo busca comparar los niveles de exposición de usuarios a nivel de calle de diferentes modos de transporte.

Se utilizó la simulación en un software de dinámica computacional de fluidos (CFD) en donde se obtienen concentraciones de los contaminantes en el dominio, luego se compararon dichas concentraciones con los niveles de exposición de usuarios a nivel de calle de diferentes modos de transporte y se repitió el proceso con estrategias de disminución de la contaminación.

En emisiones, la agrupación vehicular buses articulados y biarticulados de tránsito rápido de TransMilenio (TM) tuvieron el mayor aporte de  $PM_{2.5}$  y la de livianos fue la de mayor aporte de  $NO_x$  y CO.

En la mayoría de los casos, en las calles de la ciudad se excedió el límite recomendado de exposición a los tres contaminantes y tampoco fue suficiente el conjunto de estrategias de disminución para cumplir con la normativa en 2014. Dentro de los diferentes modos de transporte, en la mayoría de los casos se encontró que las mayores concentraciones se encuentran en las calzadas de TM, seguidas de las motos y las bicicletas y peatones.

VII Exposición a contaminantes atmosféricos a nivel de calle:  
comparación en diferentes modos de transporte y con estrategias de disminución

---

**Palabras clave:** Calidad del aire, contaminación del aire, microescala, CFD, concentraciones, exposición.

## Abstract

### **Exposure to air pollutants at street level: comparison in different transportation modes and with abatement strategies**

The study of air quality at the microscale is fundamental because it allows the evaluation of personal exposure to pollutants as well as the quantification of emission inventories. Among the most important pollutants known as criteria pollutants are particulate matter below 2.5 micrometers ( $PM_{2.5}$ ), nitrogen oxides ( $NO_x$ ) and carbon monoxide (CO) to which this work seeks to compare the exposure levels of street-level users of different modes of transportation.

It was used simulation with a computational fluid dynamic (CFD) software, where concentrations of pollutants in the domain are obtained. These concentrations were then compared with the exposure levels of street-level users of different modes of transportation and the process was repeated applying pollution abatement strategies.

In terms of emissions, articulated and bi-articulated buses of rapid transit TransMilenio (TM) vehicles had the highest contribution of  $PM_{2.5}$  and light vehicles had the highest contribution of  $NO_x$  and CO.

In most cases, the recommended limit of exposure to the three pollutants was exceeded in the city streets, and the set of abatement strategies to comply with the regulations in 2014 was not sufficient either. Within the different modes of transportation, in most cases it was found that the highest concentrations are found on TM roadways, followed by motorcycles and then bicycles and pedestrians.



# Contenido

	<b>Pág.</b>
Resumen.....	VI
Abstract.....	VIII
Contenido.....	X
Lista de figuras.....	XII
Lista de tablas.....	XIV
Lista de abreviaturas.....	XVI
Introducción.....	1
1. Marco Teórico.....	4
1.1. Afectación en la salud y normatividad.....	4
1.2. Impacto del sector transporte.....	7
1.3. Exposición a nivel de calle.....	8
1.4. Simulación con Dinámica Computacional de Fluidos.....	11
1.4.1. Modelo Miskam y Software WinMiskam®.....	12
1.4.2. Proyecto Bogotá ElektriKa.....	15
2. Metodología.....	16
2.1. Cuantificación de las concentraciones a nivel de calle.....	16
2.1.1. Ubicación de las vías y tramos de trabajo.....	16
2.1.2. Cálculo de emisiones vehiculares.....	18
2.1.3. Construcción del dominio de simulación.....	21
2.1.4. Parámetros meteorológicos en la dispersión de contaminantes.....	27
2.2. Relación de las concentraciones a nivel de calle con la exposición.....	29
2.3. Evaluación de estrategias de disminución de la contaminación.....	29

---

3. Resultados .....	31
3.1. Emisiones vehiculares.....	31
3.2. Concentraciones de simulaciones con WinMiskam .....	41
3.3. Relación de las concentraciones a nivel de calle con la exposición.....	54
3.4. Evaluación de estrategias de disminución de la contaminación.....	58
4. Conclusiones y recomendaciones .....	86
4.1. Conclusiones.....	86
4.2. Recomendaciones.....	88
Anexos .....	90
A. Factores de emisión comparados.....	90
B. Emisiones con estrategias de disminución .....	92
Bibliografía .....	112

## Lista de figuras

Figura 1.1: Configuración de la cuadrícula. ....	13
Figura 1.2: Interfaz gráfica de WinMiskam.....	14
Figura 2.1: Estación de TM Coliseo (hoy Movistar Arena) sobre la avenida NQS y alrededores. ....	17
Figura 2.2: Estación TM Calle 100 sobre la autopista norte y alrededores. ....	18
Figura 2.3: Enmallado utilizado en las simulaciones en WM.....	22
Figura 3.1: Emisiones de $PM_{2.5}$ por agrupación vehicular en la estación a) Calle 100 y b) Coliseo. ....	32
Figura 3.2: Emisiones de $PM_{2.5}$ por hora en la estación a) Calle 100 y b) Coliseo. ....	34
Figura 3.3: Emisiones de CO por agrupación vehicular en la estación a) Calle 100 y b) Coliseo. ....	36
Figura 3.4: Emisiones de CO por hora en la estación a) Calle 100 y b) Coliseo. ....	37
Figura 3.5: Emisiones de $NO_x$ por agrupación vehicular en la estación a) Calle 100 y b) Coliseo. ....	38
Figura 3.6: Emisiones de $NO_x$ por hora en la estación a) Calle 100 y b) Coliseo. ....	40
Figura 3.7: Estación Calle 100, $PM_{2.5}$ a las 13 h en escenario de línea base.....	43
Figura 3.8: Estación Calle 100, $PM_{2.5}$ a las 20 h en escenario de línea base.....	44
Figura 3.9: Estación Coliseo, $PM_{2.5}$ a las 12 h en escenario de línea base.....	45
Figura 3.10: Estación Coliseo, $PM_{2.5}$ a las 21 h en escenario de línea base.....	46
Figura 3.11: Estación Calle 100, CO a las 9 h en escenario de línea base.....	47
Figura 3.12: Estación Calle 100, CO a las 18 h en escenario de línea base.....	48
Figura 3.13: Estación Coliseo, CO a las 21 h en escenario de línea base. ....	49
Figura 3.14: Estación Calle 100, $NO_x$ a las 9 h en escenario de línea base.....	50
Figura 3.15: Estación Calle 100, $NO_x$ a las 20 h en escenario de línea base.....	51
Figura 3.16: Estación Coliseo, $NO_x$ a las 12 h en escenario de línea base.....	52
Figura 3.17: Estación Coliseo, $NO_x$ a las 21 h en escenario de línea base.....	53

---

Figura 3.18: Estación Calle 100, PM <sub>2.5</sub> a las 13 h en el escenario 1. ....	59
Figura 3.19: Estación Coliseo, PM <sub>2.5</sub> a las 12 h en el escenario 1. ....	60
Figura 3.20: Estación Calle 100, PM <sub>2.5</sub> a las 13 h en el escenario 2. ....	61
Figura 3.21: Estación Coliseo, PM <sub>2.5</sub> a las 12 h en el escenario 2. ....	62
Figura 3.22: Estación Calle 100, CO a las 9 h en el escenario 2. ....	63
Figura 3.23: Estación Calle 100, NO <sub>x</sub> a las 9 h en el escenario 2. ....	64
Figura 3.24: Estación Coliseo, NO <sub>x</sub> a las 12 h en el escenario 2. ....	65
Figura 3.25: Estación Calle 100, PM <sub>2.5</sub> a las 13 h en el escenario 3. ....	66
Figura 3.26: Estación Coliseo, PM <sub>2.5</sub> a las 12 h en el escenario 3. ....	67
Figura 3.27: Estación Calle 100, CO a las 9 h en el escenario 3. ....	68
Figura 3.28: Estación Calle 100, NO <sub>x</sub> a las 9 h en el escenario 3. ....	69
Figura 3.29: Estación Coliseo, NO <sub>x</sub> a las 12 h en el escenario 3. ....	70
Figura 3.30: Estación Calle 100, PM <sub>2.5</sub> a las 13 h en el escenario 4. ....	71
Figura 3.31: Estación Coliseo, PM <sub>2.5</sub> a las 12 h en el escenario 4. ....	72
Figura 3.32: Estación Calle 100, CO a las 9 h en el escenario 4. ....	73
Figura 3.33: Estación Calle 100, NO <sub>x</sub> a las 9 h en el escenario 4. ....	74
Figura 3.34: Estación Coliseo, NO <sub>x</sub> a las 12 h en el escenario 4. ....	75
Figura 3.35: Estación Coliseo, PM <sub>2.5</sub> a las 12 h. Porcentaje de disminución: escenario 1. .....	77
Figura 3.36: Estación Coliseo, NO <sub>x</sub> a las 12 h. Porcentaje de disminución: escenario 2..	79
Figura 3.37: Estación Calle 100, NO <sub>x</sub> a las 9 h. Porcentaje de disminución: escenario 3.	80
Figura 3.38: Estación Calle 100, CO a las 9 h. Porcentaje de disminución: escenario 4..	82
Figura 3.39: Porcentaje de disminución con escenarios de estrategias por modo de transporte. ....	85

## Lista de tablas

Tabla 1.1: Concentraciones máximas para tiempo de exposición. Fuente: (MADS, 2010). .....	5
Tabla 1.2: Concentraciones máximas para tiempo de exposición. Fuente: (MADS, 2017). .....	5
Tabla 1.3: Concentraciones máximas para tiempo de exposición en el año 2030. Fuente: (MADS, 2017).....	6
Tabla 1.4: Concentraciones máximas para tiempo de exposición. Fuente: (WHO, 2021). 6	
Tabla 1.5: Estudios de exposición a PM <sub>2.5</sub> en varios modos de transporte. Fuente: ver tabla. .....	10
Tabla 2.1: Factores de emisión (g/km) ponderados por agrupación de categorías vehiculares. Fuente: (SDA, 2010), (UNAL, 2012), (UNAL, 2013) adaptados por autor. ...	20
Tabla 2.2: La hora de los conteos vehiculares, velocidad y dirección del viento (según la inclinación respecto al norte del lugar a modelar) para cada caso a simular, junto con la altura del anemómetro de la estación de la RMCAB. Concentraciones para ser tomadas como valores de fondo (background) en los sitios de modelación. Fuente: Autor y RMCAB. .....	28
Tabla 2.3: Estrategias de disminución de la contaminación de combustión y resuspensión a simular. Fuente: Autor. ....	30
Tabla 3.1: Concentraciones simuladas en el escenario línea base en los puntos marcados con los círculos rojos anteriormente especificando las coordenadas de la celda (i eje x, j eje y) para cada modo de transporte. Fuente: Autor.....	56
Tabla 3.2: Concentración simulada más la de fondo en el escenario línea base para cada modo de transporte. Fuente: Autor. ....	57
Tabla 3.3: Concentración simulada más de fondo en escenarios de estrategias de disminución por modo de transporte Fuente: Autor. ....	84

Tabla 3.4: Porcentaje de disminución con estrategias de disminución por modo de transporte. Fuente: Autor.....84

## Lista de abreviaturas

### Abreviatura Término

---

APP	Alianza público privada
C	Camiones
CC	Camperos y camionetas
CFD	Dinámica Computacional de Fluidos (por su sigla en inglés)
CO	Monóxido de carbono
EPA	Agencia de protección ambiental (por su sigla en inglés) de EUA
MADS	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial
NO	Monóxido de nitrógeno
NO <sub>2</sub>	Dióxido de nitrógeno
NO <sub>x</sub>	Óxidos de nitrógeno
PM	Material particulado (por su sigla en inglés)
PM <sub>2.5</sub>	Material particulado inferior a 2,5 micrómetros
PM <sub>10</sub>	Material particulado inferior a 10 micrómetros
PDDAB	Plan decenal de descontaminación del aire de Bogotá
RM CAB	Red de monitoreo de calidad del aire de Bogotá
SDA	Secretaría Distrital de Ambiente
SITP	Sistema integrado de transporte público
sL	Carga de sedimentos (por su sigla en inglés) finos por superficie de vía
UNAL	Universidad Nacional de Colombia
VP	Vehículos de pasajeros
WM	WinMiskam® (software CFD)

## Introducción

La concentración de las actividades antropogénicas contaminantes en las grandes urbes trae consigo una exacerbación de los problemas de polución. La contaminación del aire en las calles de los centros urbanos afecta directamente la salud de las personas en ellas. Hay contaminantes que afectan directamente la salud de las personas, entre ellos el material particulado inferior a 2.5 micrómetros,  $PM_{2.5}$ , y los  $NO_x$  y el CO que son unos de los principales contaminantes criterio. El primero se ha relacionado con afectaciones respiratorias agudas y crónicas así como enfermedades cardiovasculares, afecta hasta los alvéolos pulmonares; el segundo aumenta los síntomas en los bronquios de niños con asma y reduce la función pulmonar; el tercero al llegar a la sangre puede producir carboxihemoglobina.

Dentro de los causantes de la contaminación urbana, las fuentes móviles de emisión son las que más afectan la calidad del aire en los centros urbanos (Rodríguez y Behrentz, 2009) y se genera un ciclo de retroalimentación positiva de contaminación teniendo en cuenta el constante incremento de vehículos particulares, y congestión en la vías producida y la consecuente mayor emisión de contaminantes. Es indispensable conocer la exposición a los contaminantes a nivel de calle y evaluar las diferentes alternativas para reducirla.

En otros países se han usado modelos numéricos para determinar la exposición (Chang *et al.*, 2012; Nyhan *et al.*, 2014) y de CFD, que tiene en cuenta la geometría de calle en la microescala, para  $PM_{2.5}$  (Ren *et al.*, 2022). Pero dentro de lo publicado conocido no se ha evaluado en un solo estudio con CFD la exposición a los contaminantes criterio de este trabajo.

En la ciudad capital de Colombia, Bogotá, se han realizado trabajos sobre la dispersión de contaminantes a escala local, y algunos trabajos en la microescala o a nivel de calle en donde se presenta la exposición directa a los contaminantes. Dentro las publicaciones

disponibles, en Bogotá a nivel de calle se han medido y calculado las concentraciones exteriores (para peatones, ciclistas y motociclistas). Se ha cuantificado la exposición de los viajeros en diversos modos de transporte mediante mediciones o mediante monitoreos a nivel de calle. Se midió la exposición a material particulado inferior a 10 micrómetros ( $PM_{10}$ ) para ciclistas (O. A. Fajardo y Rojas, 2012). Además se ha medido la exposición para peatones y motociclistas a  $PM_{2.5}$  (Morales Betancourt *et al.*, 2017). Se ha utilizado un modelo gaussiano que no tiene en cuenta la geometría de las calles pero que es de cálculo más rápido, denominado R-LINE para calcular las concentraciones de CO,  $NO_x$  y  $PM_{2.5}$  (Pachón *et al.*, 2016). También se han usado modelos de calidad del aire a microescala CFD (Zamudio, 2016)(Belalcazar-Cerón *et al.*, 2021).

Por otra parte se han medido concentraciones interiores de  $PM_{2.5}$  en carros y buses de TM (Morales Betancourt *et al.*, 2017)(Castillo-Camacho *et al.*, 2020). Pero no se han evaluado múltiples escenarios de disminución de la contaminación, solo se ha evaluado un escenario de mejora tecnológica en buses de TM, uno medido (Morales Betancourt *et al.*, 2022) y otro calculado (Belalcazar-Cerón *et al.*, 2021); esta información es muy importante para la toma de decisiones. Se ha calculado la autocontaminación en un bus de TM utilizando un modelo CFD (Guevara Luna, 2018). Sin embargo dichos estudios son escasos, y solo se enfocan principalmente en el estudio del  $PM_{2.5}$ .

Para el momento de finalización de escritura de este documento, la alcaldía de Bogotá ha dado a conocer lo que serán las Zonas Urbanas por un Mejor Aire (ZUMA), en búsqueda de mediante “diferentes acciones para cumplir con el objetivo intermedio 3 de la Organización Mundial de la Salud (OMS) en la concentración de material particulado 2.5, que correspondiente a  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en el corto plazo; en el mediano, de  $9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; y en el largo, de  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ” (SDA, 2022a).

En el presente trabajo final de maestría se buscó comparar los niveles de exposición a  $PM_{2.5}$ , CO y  $NO_x$  de usuarios a nivel de calle de diferentes modos de transporte en la ciudad de Bogotá. Para tal fin se utilizó el software CFD, WinMiskam (WM), para calcular la dispersión de los contaminantes a nivel de calle y obtener las concentraciones de dichos contaminantes y relacionarlos con la exposición a nivel de calle tanto para una línea base como para escenarios de disminución.

En otros países se han hecho (dentro de lo revisado) estas comparaciones de la exposición a contaminantes primarios como el  $PM_{2.5}$  y el CO. Sin embargo las que incluyan simultáneamente los  $NO_x$  no se han encontrado. El estudio de estos contaminantes a nivel de calle es de gran importancia para las ciudades y el cuidado de la salud y por tanto este trabajo hace un aporte en esta dirección. De este modo los objetivos específicos del presente trabajo final de maestría son:

#### Objetivos Específicos

- A. Calcular las concentraciones de contaminantes a nivel de calle por medio de simulaciones con dinámica computacional de fluidos (CFD).
- B. Relacionar las concentraciones calculadas a nivel de calle con los niveles de exposición de usuarios de diferentes modos de transporte y compararlos.
- C. Cuantificar las concentraciones de contaminantes a nivel de calle tras la consideración de diferentes estrategias para su disminución.
- D. Relacionar las concentraciones obtenidas tras la consideración de diferentes estrategias para su disminución, con los niveles de exposición de usuarios de diferentes modos de transporte y compararlos.

# 1.Marco Teórico

## 1.1. Afectación en la salud y normatividad

La contaminación del aire en las calles de los centros urbanos afecta directamente la salud de las personas que transitan en ellas. El aumento en la contaminación del aire en Bogotá, está directamente relacionada con el incremento histórico en enfermedades respiratorias (Franco *et al.*, 2007); por la exposición, entre otros, a los contaminantes criterio estudiados en el presente trabajo,  $PM_{2.5}$  y gases como  $NO_x$  y CO. Las concentraciones de PM tienen una relación directamente proporcional con la cantidad de hospitalizaciones por afectaciones respiratorias agudas y crónicas y la mortalidad que éstas pueden causar generan grandes costos sociales y privados (García, 2010).

El PM se ha relacionado además con enfermedades cardiovasculares (Peñaloza, 2010) y asma (Vardoulakis *et al.*, 2014); en general, la población infantil menor a 5 años y la que usa las ciclorutas, tienen los mayores riesgos. Es así como este contaminante tuvo la mayor meta de porcentaje de reducción en el plan decenal de descontaminación del aire para Bogotá (PDDAB) 2010-2020.

Son múltiples las afectaciones a la función respiratoria por la exposición, entre otros, a  $PM_{2.5}$ ,  $NO_x$  y CO, afectando hasta los alvéolos pulmonares el  $PM_{2.5}$ , uno de los mayores contaminantes primarios (Belalcazar, 2009). Por su parte el CO al llegar a la sangre puede producir carboxihemoglobina. Por otra parte estudios epidemiológicos han mostrado que la larga exposición a dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ , uno de los gases que hacen parte de los  $NO_x$ ) aumenta los síntomas en los bronquios de niños con asma así como una reducción de la función pulmonar.

Para la época de los datos de este estudio, la norma aplicable en Colombia sobre concentraciones máximas permisibles para tiempo de exposición, era la Resolución 610 de 2010 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MADS, 2010). La normatividad vigente de calidad del aire en Colombia está dada por la Resolución 2254 de 2017 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MADS, 2017). En ellas aparecen los valores máximos recomendados en concentraciones de contaminantes por tiempo de exposición, que se muestran a continuación:

Tabla 1.1: Concentraciones máximas para tiempo de exposición. Fuente: (MADS, 2010).

Contaminante	Nivel Máximo Permissible	Tiempo de Exposición
	( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	
PM <sub>2.5</sub>	25	Anual
	50	24 horas
NO <sub>2</sub>	100	Anual
	150	24 horas
	200	1 hora
CO	10.000	8 horas
	40.000	1 hora

Tabla 1.2: Concentraciones máximas para tiempo de exposición. Fuente: (MADS, 2017).

Contaminante	Nivel Máximo Permissible	Tiempo de Exposición
	( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	
PM <sub>2.5</sub>	25	Anual
	37	24 horas
NO <sub>2</sub>	60	Anual
	200	1 hora
CO	5.000	8 horas
	35.000	1 hora

Se debe considerar que la mayor parte del NO<sub>2</sub> atmosférico se emite en forma de NO que

se oxida rápidamente a  $\text{NO}_2$  por acción del ozono (WHO, 2005). Así mismo dicha última resolución plantea los valores máximos permisibles para el año 2030:

Tabla 1.3: Concentraciones máximas para tiempo de exposición en el año 2030. Fuente: (MADS, 2017).

<b>Contaminante</b>	<b>Nivel Máximo Permissible (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>Tiempo de Exposición</b>
PM <sub>2.5</sub>	15	Anual
NO <sub>2</sub>	40	Anual

Recientemente la OMS publicó nuevos lineamientos de calidad del aire que son en general más exigentes que la normatividad nacional y se resumen a continuación:

Tabla 1.4: Concentraciones máximas para tiempo de exposición. Fuente: (WHO, 2021).

<b>Contaminante</b>	<b>Nivel Máximo Permissible (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>Tiempo de Exposición</b>
PM <sub>2.5</sub>	5	Anual
	15	24 horas
NO <sub>2</sub>	10	Anual
	25	24 horas
CO	4.000	24 horas

De esta manera se deben plantear estrategias de disminución que permitan estar expuestos a concentraciones por debajo de lo recomendado en cuanto sea posible, lo cual requiere un esfuerzo por parte de los entes de control y los usuarios mismos de los modos de transporte, acompañado de incentivos. Recientemente la alcaldía de Bogotá ha dado a conocer lo que serán las Zonas Urbanas por un Mejor Aire (ZUMA), en búsqueda de mediante “diferentes acciones para cumplir con el objetivo intermedio 3 de la Organización Mundial de la Salud (OMS) en la concentración de material particulado 2.5, que correspondiente a  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en el corto plazo; en el mediano, de  $9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; y en el largo, de  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ” (SDA, 2022a).

## 1.2. Impacto del sector transporte

Las fuentes móviles de emisión son las que más afectan la calidad del aire en los centros urbanos (Rodríguez y Behrentz, 2009). El parque automotor que se moviliza en Bogotá es alrededor del 20% del total del país (Hernandez-Gonzalez y Jiménez, 2011). La categoría vehicular livianos, que incluye automóviles, camperos y camionetas, taxis, fue con bastante diferencia el principal emisor de los dos gases (CO y NO<sub>x</sub>) mientras que los camiones lo fueron, para el PM<sub>2.5</sub> en los inventarios de emisiones para toda la ciudad del año 2014 (SDA, 2020), esto para los contaminantes criterio estudiados en el presente trabajo.

Con el constante incremento de vehículos particulares y congestión en las vías y la consecuente mayor emisión de contaminantes, se genera un ciclo de retroalimentación positiva de contaminación. Lo anterior se presenta con los trancones, el tener que parar y poner en marcha de nuevo el vehículo produce un mayor consumo de combustible y polución; la concentración de contaminantes seguirá aumentando, por lo que es necesaria la evaluación e implementación de sistemas de transporte público sostenibles y estrategias de disminución de la contaminación de vehículos particulares.

En este sentido la tecnología predominante para reducir las emisiones de combustión a cero en su uso directo es la eléctrica, también hay tecnología por implementarse más como la de hidrógeno verde como combustible, pues los vehículos eléctricos tienen el problema si se analiza desde el punto de vista de análisis de ciclo de vida, de los metales pesados de la fabricación de su batería y su disposición final. En este aspecto hay una creciente implementación del sistema integrado de transporte público (SITP) con buses padrones con nuevas tecnologías de bajas emisiones o eléctricos en Bogotá.

Además hay estrategias que permiten la disminución del tráfico vehicular, que tiene impactos positivos en la salud (Rojas-Rueda, 2012), como el pico y placa, la restricción a la circulación de vehículos particulares. Esta entre 6 a.m. y 9 p.m. alternado para placas pares e impares en fechas pares e impares, de la cual se encuentran exentos los vehículos eléctricos, híbridos y los que circulen con al menos 3 ocupantes (SDM, 2022).

De lo anterior, los beneficios son múltiples, no obstante una mejor solución es usar vehículos eléctricos y dejar de usar tanto el vehículo particular (o darle un uso compartido). También migrar al transporte público que debe continuar mejorando su servicio en términos de capacidad y velocidad (aunque la velocidad sea más difícil con más buses troncales o zonales en las vías).

En Bogotá ya se encuentra en camino el tan ansiado proceso de construcción de un metro que será elevado y subterráneo y un posible tranvía que va a fortalecer el sistema de transporte público y a ayudar a descongestionar las vías, además de no emitir contaminantes de combustión.

Las motos son otro modo de transporte de gran crecimiento en la ciudad (Oróstegui, 2019), por lo cual se requiere un pico y placa también para estas que a pesar de ser más livianas y de menor cilindraje que los automóviles, tienen un mayor potencial de contaminación en varias subcategorías vehiculares de los contaminantes criterio estudiados en el presente trabajo, al tener un mayor factor de emisión. En estas así como en los camiones que son el 42% de todas las emisiones móviles en 2020 (SDA, 2022b) y demás categorías vehiculares se necesita implementar todo el parque automotor con tecnologías eléctricas.

Otro aspecto a considerar son las emisiones de  $PM_{2.5}$  por resuspensión que llegan al 67% de este para la ciudad en 2020 (SDA, 2022b), con el paso de los vehículos en las vías no pavimentadas y pavimentas, que se presentan por el material particulado acumulado sobre las vías y que pueden ser mitigadas con el barrido y lavado de estas (Kryłów y Generowicz, 2019).

### **1.3. Exposición a nivel de calle**

En las vías de transporte de la ciudad se combinan altas concentraciones de contaminantes y constante paso de personas que entran en contacto con estos contaminantes, es decir, que están expuestas (WHO y IPCS, 2005).

En las áreas urbanas la gente toma cerca del 7% del día transportándose, expuestos a ambientes contaminados (Zhu, Demokritou, & Spengler, 2010); los peatones son a quienes les toma más tiempo desplazarse en las calles contaminadas, es decir, tienen mayor

tiempo de exposición siendo altamente vulnerables. El tiempo de exposición se potencia con las altas concentraciones generando un impacto importante. La gran mayoría de los estudios de distribución de contaminantes publicados hasta el momento en Bogotá, se desarrollan para una escala local o mesoescala.

No obstante es en la microescala, particularmente a nivel de calle, donde las personas se encuentran directamente expuestas, de manera que es necesario profundizar su conocimiento. Para esta escala se pueden usar modelos CFD, que tienen en cuenta la geometría de la calle, como se hace en el presente trabajo para simular la dispersión de los contaminantes y sus concentraciones a nivel de calle en una línea base y con diferentes estrategias de disminución. No obstante estos conllevan incertidumbres, por ejemplo, en los factores de emisión de vehículos que se utilizan (Belalcazar & Zamudio, 2013) y que pueden ser estimadas con metodologías como Monte Carlo (Peñaloza, 2010).

En otros países se han realizado estudios de comparación de la exposición de usuarios de algunos modos de transporte a  $PM_{2.5}$  (Briggs *et al.*, 2008; Int Panis *et al.*, 2010; Kingham *et al.*, 2013; Nyhan *et al.*, 2014) o incluyendo también a CO (Kaur, Nieuwenhuijsen y Colville, 2007; de Nazelle *et al.*, 2012; Huang *et al.*, 2012). También se han usado modelos numéricos y de CFD para determinar la exposición (Chang *et al.*, 2012; Nyhan *et al.*, 2014) (Ren *et al.*, 2022) que puede ser calculada en cada caso con diferentes modelos y factores (WHO y IPCS, 2005; EPA, 2011b). Pero dentro de lo publicado conocido no se ha evaluado en un solo estudio con CFD la exposición a los contaminantes criterio de este trabajo.

En Bogotá se utilizó un modelo gaussiano que no tiene en cuenta la geometría de las calles pero de más rápido cálculo, denominado R-LINE para obtener las concentraciones en microescala, exteriores, de CO,  $NO_x$  y  $PM_{2.5}$  (Pachón *et al.*, 2016). Además se midió la exposición a  $PM_{10}$ , de los ciclistas que transitan por una cicloruta (Fajardo & Rojas, 2012), encontrando que, aunque están más alejados de las emisiones vehiculares, su mayor consumo de aire genera una mayor exposición. También se ha incluido además carbono elemental (Franco *et al.*, 2013), mostrando cómo se superan los límites de exposición recomendados por la OMS. Se ha medido la exposición personal (Franco Gantiva, 2014) de usuarios de diferentes modos de transporte a  $PM_{2.5}$  encontrando que los ciclistas son los más expuestos.

Es así como es necesario integrar y realizar una comparación de la exposición de usuarios de diferentes modos de transporte a los citados contaminantes relevantes. Para realizar esto se puede conocer la concentración de los contaminantes dentro de los vehículos. Esta se puede estimar con la entrada de los contaminantes producidos por el mismo vehículo, llamada “self pollution” o “autocontaminación” (Guevara Luna, 2018), e “intake fraction” (Marshall y Behrentz, 2005) de los presentes en el ambiente inmediatamente alrededor del mismo, atribuible a los demás vehículos que circulan por la vía (Liu & Frey, 2011). Lo anterior usando diferentes modelos matemáticos que están fuera del alcance de este trabajo.

Zamudio (Zamudio, 2016) menciona un estudio también de  $PM_{2.5}$  en Bogotá en donde la mayor exposición la tienen los usuarios de TM; otro estudio que midió la contaminación interior en estos buses de TM, obtuvo no obstante la mayor dosis inhalada para los peatones (Morales Betancourt *et al.*, 2017). Zamudio en un estudio también midió la concentración de  $PM_{2.5}$  en Bogotá en exteriores del sistema TM (Zamudio, 2016). En la misma ciudad se ha medido la exposición al mismo contaminante en buses de TM y en la entrada de la estación con un cambio de tecnología de estos (Morales Betancourt *et al.*, 2022)(Belalcazar-Cerón *et al.*, 2021). A continuación se presentan algunos de estos estudios realizados, los rellenos en azul corresponden a estudios realizados en ambientes interiores y los grises en exteriores:

Tabla 1.5: Estudios de exposición a  $PM_{2.5}$  en varios modos de transporte. Fuente: ver tabla.

Estudio	Modo de Transporte, $PM_{2.5}$ ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )				
	A pie	Bicicleta	TM	Moto	Carro
(Morales Betancourt <i>et al.</i> , 2022)			129,5		
(Castillo-Camacho <i>et al.</i> , 2020)			167,3		
(O. a. Fajardo y Rojas, 2012)		93*			
(Morales Betancourt <i>et al.</i> , 2017)	37,5	51,8	167,3	151,0	96,7

\* $PM_{10}$

Por otra parte del estudio realizado por Guevara (Guevara Luna, 2018) se obtuvieron los datos de concentración de CO en el interior de vehículos de TM, con los cuales se obtuvo un promedio para la concentración en estos buses de  $2.360 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Hay muchas estrategias para evaluar, dichas estrategias deben, bajo el principio base de que todos somos peatones, procurar un ambiente más limpio. Hay conceptos como el diseño urbano sustentable y el desarrollo orientado al tránsito (TOD, sigla en inglés) que han sido implementados en ciudades en el trópico (Hsieh & Wu, 2012) para este fin. Es por esto que la formulación de políticas públicas de control y mitigación de la contaminación (Zárate *et al.*, 2007) que son necesarias para mejorar la calidad del aire, deben considerar este tipo de estrategias previsibles; para que sean más efectivas y eficientes al momento de su aplicación.

## **1.4. Simulación con Dinámica Computacional de Fluidos**

La simulación con CFD analiza los sistemas con flujo de fluidos, transferencia de calor y fenómenos asociados como reacciones químicas con el uso de métodos numéricos basados en computación.

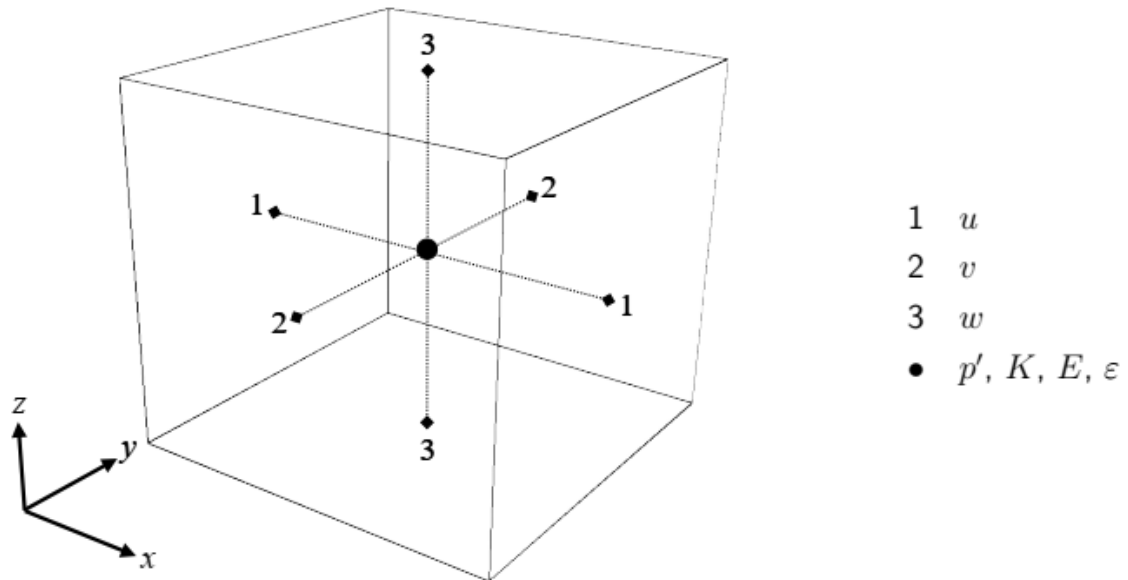
La mayoría de software CFD incluye tres partes: un preprocesador para introducir los parámetros de entrada, generar la grilla del dominio computacional, seleccionar los fenómenos físicos y químicos a tratar, definir las propiedades del fluido y las condiciones de frontera. Un solver (palabra en inglés) que primero aproxima numéricamente las variables de flujo desconocidas, luego discretiza las ecuaciones de flujo con esas aproximaciones y resuelve el sistema de ecuaciones algebraicas resultante. Y un posprocesador que muestra la grilla y geometría del dominio, grafica vectores (como la velocidad del viento) y contornos (como la concentración de contaminante) pudiendo proveer aún prestaciones animadas para mostrar resultados dinámicos. La simulación CFD se basa en la solución numérica de las ecuaciones de flujo de fluidos y dispersión derivadas de los principios de conservación y transporte; además, los procesos atmosféricos turbulentos necesitan ser modelados (Vardoulakis *et al.*, 2014).

Se han utilizado herramientas CFD en diferentes ciudades del mundo para simular la dispersión de los contaminantes y obtener las concentraciones, como en el presente trabajo; CFD para los tres contaminantes criterio citados previamente (no simultáneamente), para configuraciones y tamaños específicos de la configuración citadina de cañones urbanos (SC, por su sigla en inglés) (Pospisil y Jicha, 2007; Gromke y Ruck, 2008). Estas, variando parámetros como el tamaño del dominio y las celdas (Belalcazar & Zamudio, 2013), la velocidad y dirección del viento (Belalcazar, 2009; McNabola, Broderick y Gill, 2009; Hsieh y Wu, 2012). En Bogotá ya se han utilizado herramientas CFD validadas para evaluar la dispersión de los contaminantes en varias vías y evaluando escenarios de disminución (Belalcazar & Zamudio, 2013). Como buses eléctricos en el sistema de transporte masivo (buses de tránsito rápido, BRT por su sigla en inglés) de la ciudad, TM (Belalcazar-Cerón *et al.*, 2021). Se ha calculado el valor de autocontaminación para un bus de TM, en 18% calculado para el  $PM_{2.5}$  (Guevara Luna, 2018).

#### **1.4.1. Modelo Miskam y Software WinMiskam®**

Miskam es un modelo de microescala climática (como fue originalmente planeado) y de dispersión no hidrostático, tridimensional de dispersión euleriana, desarrollado por el Dr. Joachim Eichhorn del Instituto de Física de la Atmósfera de la Universidad de Mainz. Que realiza cálculos de flujo y dispersión en áreas construidas de cerca de  $1000 \times 1000 \times 300$  m con tamaño de grilla de 1 a 10 m. Su base física son las ecuaciones tridimensionales de momentum para simular las condiciones de flujo, así como la ecuación de advección-difusión para concentraciones de masa, basado en el cálculo de la dispersión de sustancias de densidad neutra.

Figura 1.1: Configuración de la cuadrícula.



Fuente: (Eichhorn, 2008).

Miskam es especialmente útil para la planeación en carretera y urbana porque considera principalmente los fenómenos físicos que influyen el transporte de contaminantes dentro del ambiente directo de edificios (Eichhorn, 2008). El modelo no es aplicable a topografía empinada, estratificación térmica inestable y sobresaturación; no tiene en cuenta la química atmosférica; resuelve las ecuaciones “Reynolds-averaged Navier–Stokes” (RANS) con un esquema  $k-\varepsilon$  modificado en una grilla cartesiana no uniforme (Donnelly, Lyons y Flassak, 2009).

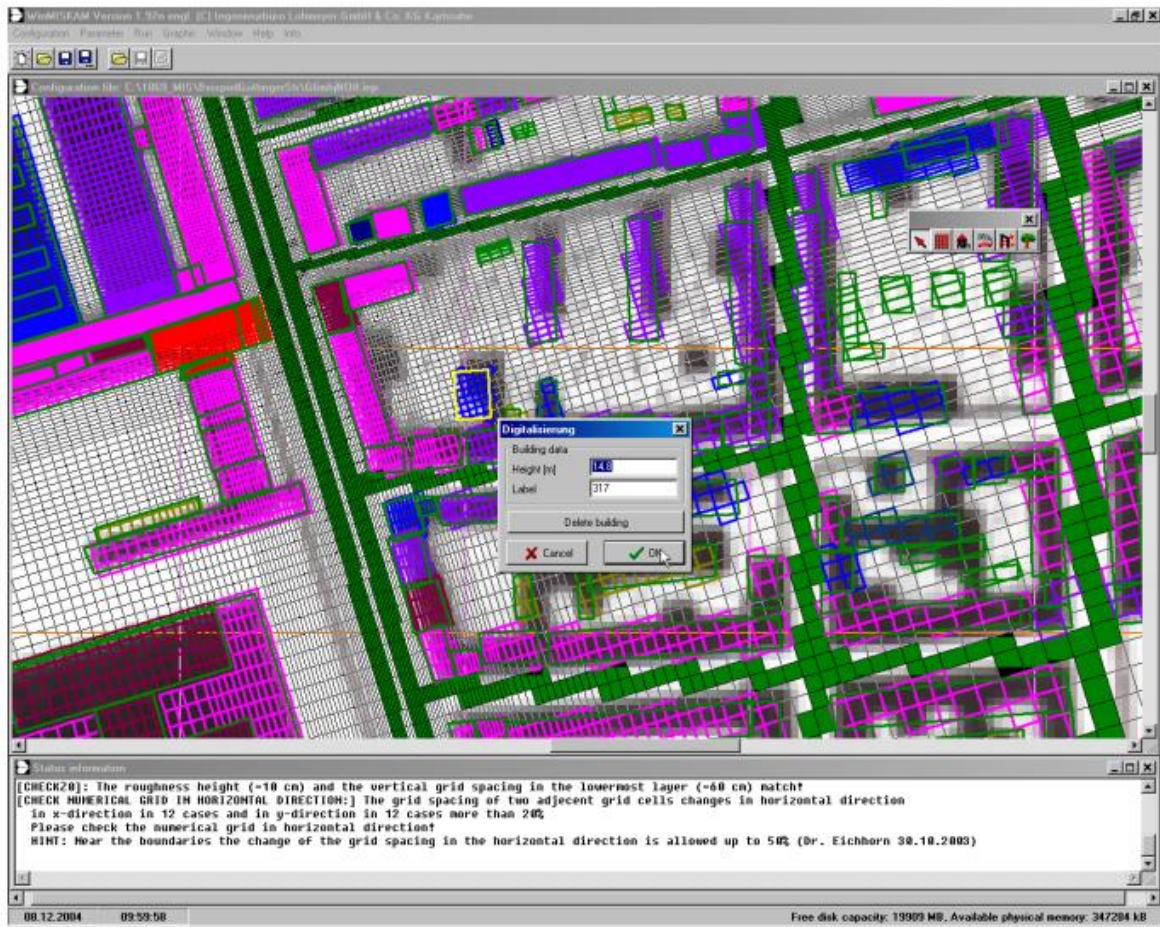
Las soluciones numéricas usan los siguientes esquemas:

- Diferencias hacia delante en el tiempo.
- Advección ascendente esquema McCormack opcional (momento) y esquema Smolarkiewicz (escalares).
- Proceso ADI para ecuaciones de difusión.
- Proceso SOR para la ecuación de Poisson.

WM es un software comercial de la empresa alemana Lohmeyer, es la interfaz gráfica para Windows® del modelo Miskam. La interfaz amigable de WM genera los archivos

necesarios para los cálculos y provee la implementación visual de edificios y fuentes de contaminación, así como la definición de la grilla computacional en pantalla. WM realiza la simulación de la dispersión de contaminantes en microambientes urbanos con edificios, arcos, vegetación, fuentes de emisión puntual, lineal y de área. La simulación de la influencia de edificios y otras barreras en las propiedades de flujo es posible mediante estructuras de bloques rectangulares. Los datos digitalizados son transferidos por WM a la grilla computacional. Además permite la computación de casos individuales como de múltiples automatizados por lotes (Eichhorn, 2018) e incluir la conversión de  $\text{NO}_x$ , que no se incluye en este trabajo.

Figura 1.2: Interfaz gráfica de WinMiskam.



Fuente: (Eichhorn, 2018).

El modelo y software han sido validados extensamente en varios países (Donnelly, Lyons y Flassak, 2009), (Belalcazar, 2009) y en la ciudad de Bogotá por Zamudio (Zamudio,

2016). También en el proyecto alianza público privada (APP) Bogotá ElektriKA (BE) (Belalcazar-Cerón *et al.*, 2021). De modo que se usa en el presente trabajo para obtener las concentraciones de los tres contaminantes a nivel de calle sin tener que validarlo de nuevo. Zamudio concluye que: “se encuentra que el parámetro que es más importante en la sensibilidad del modelo es el tamaño de la celda. El tamaño afecta bastante los resultados, identificando que el valor recomendado es de un metro (1x1x1 m) para modelos CFD en calidad del aire. Parámetros que no afectan de manera significativa los resultados son la rugosidad del suelo y de los edificios” (Zamudio, 2016).

## 1.4.2 Proyecto Bogotá ElektriKA

Del artículo sobre la APP Bogotá ElektriKA - BE (Belalcazar-Cerón *et al.*, 2021): este trabajo tuvo como objetivo evaluar los efectos del cambio de los actuales buses diésel TM por buses de propulsión eléctrica (a base de baterías y cables), en las concentraciones de  $PM_{2.5}$  a nivel de superficie. Se realizaron cálculos de emisiones teniendo en cuenta las combustiones y la resuspensión de TM y no TM. Se implementó el modelo CFD WM para estimar las concentraciones actuales de  $PM_{2.5}$  a nivel de carretera, y los resultados CFD fueron validados utilizando parámetros estadísticos. Los resultados de los cálculos de las emisiones indican que los buses de TM son una de las principales fuentes de  $PM_{2.5}$  primarias (30-50%) en todos los sitios urbanos considerados en este estudio. Las emisiones no procedentes del tubo de escape de la mayoría de las categorías de vehículos también se identificaron como una fuente importante de  $PM_{2.5}$  primarias (40% de las emisiones totales). El modelo CFD reprodujo fielmente las tendencias y los niveles de las concentraciones de  $PM_{2.5}$  medidas al pie de vía en todos los lugares. La sustitución de los vehículos diésel de TM por vehículos eléctricos redujo las concentraciones de  $PM_{2.5}$  entre un 10% y un 30% según los resultados del CFD obtenidos.

En el estudio también se encontró: que se pueden conseguir mayores reducciones si se adoptan políticas de control de otros tipos de vehículos y de las emisiones no procedentes de los gases de escape, ya que su contribución es de aproximadamente el 60%. Sin embargo, en BE no se estudió el CO y los  $NO_x$ , y tan solo se evaluó el impacto en la calidad del aire para una sola estrategia de control. Este trabajo final de maestría aborda estos aspectos y hace aportes en éste campo.

## **2. Metodología**

### **2.1. Cuantificación de las concentraciones a nivel de calle**

#### **2.1.1. Ubicación de las vías y tramos de trabajo**

Los sitios modelados en Bogotá fueron: los alrededores de la estación de TM Coliseo (hoy en día llamada Movistar Arena) sobre la avenida Norte Quito Sur (NQS), partiendo del dominio de simulación realizado por Zamudio (Zamudio, 2016); también los alrededores de la estación Calle 100 sobre la autopista norte, que presenta un altísimo flujo de pasajeros. Se utilizaron datos (conteos vehiculares, Excel de cálculo de emisiones y dominio de simulación construido por este autor) de la APP Bogotá Elektrika (Belalcazar-Cerón *et al.*, 2021). En el trabajo realizado por Zamudio (Zamudio, 2016) se realizó la validación del software CFD WM, con monitoreos en vía, como lo dice a continuación:

“Durante la primera fase, el modelo comercial CFD WM fue calibrado y evaluado utilizando los datos recogidos en un estudio de trazadores desarrollado en la ciudad de Ho Chi Minh, Vietnam. El resultado de esta fase sirvió para encontrar la configuración más adecuada del modelo. A continuación, se seleccionaron dos corredores de tráfico representativos de la ciudad para completar una campaña de campo para obtener todos los datos necesarios para realizar ejercicios con el modelo. La información recopilada incluyó: medidores de tráfico, mediciones de concentración de  $PM_{2.5}$ , velocidad y dirección del viento, entre otros. Los medidores de tráfico se utilizaron para estimar las emisiones generadas en los corredores según la composición de la flota; este resultado se utilizó como entrada para estimarla dispersión y el desplazamiento de las partículas mediante el modelo CFD.

Posteriormente, los datos reales de PM recogidos se utilizaron para evaluar la precisión del modelo y para evaluar los parámetros de calibración”. Por su parte en la APP Bogotá Elektrika se hizo una validación con datos monitoreados en vía. Los resultados de esta validación se aprecian en la figura 7 para el mismo lugar de la estación Calle 100, del artículo antes citado, es decir (Belalcazar-Cerón *et al.*, 2021). Estos resultados permitieron verificar la idoneidad de los conteos vehiculares recogidos en los días de dicho estudio.

Figura 2.1: Estación de TM Coliseo (hoy Movistar Arena) sobre la avenida NQS y alrededores.



Fuente: Google Earth.

Figura 2.2: Estación TM Calle 100 sobre la autopista norte y alrededores.



Fuente: Google Maps.

### 2.1.2. Cálculo de emisiones vehiculares

Como parámetro de entrada el modelo requiere emisiones  $E$  (que son calculadas en masa por unidad de tiempo y área) con las unidades  $\text{mg}/(\text{m}^2\text{s})$ , que fueron calculadas según la ecuación 2.1 (ver a continuación) para cada contaminante  $i$ , tomando los conteos vehiculares horarios  $N$  (vehículos/hora), de 6 am (6 h) a 9 pm (21 h) para las agrupaciones vehiculares  $j$ , en el día 08/09/2014 para la estación Calle 100 y el 21/05/2014 para la estación Coliseo. Luego, multiplicándolos por los factores de emisión  $FE$  ( $\text{g}/\text{km}$ ) para cada contaminante  $i$  para las agrupaciones vehiculares  $j$  hechas con las categorías vehiculares del PDDAB (SDA, 2010), actualizados para las motos, buses y busetas y buses articulados

y biarticulados de TM según el entonces Grupo de Investigación en Biocombustibles, Energía y Protección del Medio Ambiente, del Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.

Factores de emisión que fueron ponderados multiplicando el factor de emisión para cada categoría vehicular por la cantidad de vehículos por categoría vehicular y dividiendo en el total de vehículos agrupados. Cantidad de vehículos que aparece en el PDDAB y que fue actualizada con el registro distrital automotor (RDA) del año 2014. Después multiplicados por la longitud  $L$  del dominio (300 m en todos los casos) y dividido todo entre el área  $A_c$  ( $m^2$ ) de cada calzada  $c$  y por el factor de conversión de unidades 3600 (al pasar gramos a miligramos y kilómetros a metros en el numerador y horas a segundos en el denominador).

$$E_i = \frac{N_j \times FE_{ij} \times L}{3600 \times A_c} \quad (2.1)$$

La tipología de transporte de carga agrupa dos tipos de categorías vehiculares, camiones (C), camperos y camionetas (CC). Según la actualización de la matriz origen destino de carga para el año 2014, solo el 31,9% del parque automotor de este tipo de transporte se encuentra registrado en Bogotá; la cantidad restante provienen de municipios cercanos a Bogotá (SDA, 2017). Por lo tanto se adicionaron más del 68% de vehículos de carga con ACPM como combustible, como también lo hicieron en el PDDAB, que circulan por la ciudad estando registrados fuera de ella. La categoría vehicular vehículos de pasajeros (VP) constituye junto con la de CC, los vehículos particulares, siendo equivalentes a la agrupación livianos que aparecen en los conteos vehiculares. Las agrupaciones vehiculares hechas con las categorías vehiculares del PDDAB y factores de emisión ponderados se muestran a continuación:

Tabla 2.1: Factores de emisión (g/km) ponderados por agrupación de categorías vehiculares. Fuente: (SDA, 2010), (UNAL, 2012), (UNAL, 2013) adaptados por autor.

	Factor de emisión (g/km)		
	PM	NO <sub>x</sub>	CO
<b>VP y CC</b>	0,0046	1,5	32,1
<b>Taxis</b>	0,003	3,1	11,4
<b>Microbuses</b>	0,035	4,9	33,4
<b>Buses y Busetas</b>	0,114	11,5	30,3
<b>Buses escolares/turismo</b>	0,612	13,4	8,0
<b>Buses TM</b>	0,083	16,8	15,7
<b>C1,4,6</b>	0,653	8,4	27,2
<b>C2,3,5,7</b>	0,528	9,3	10,6
<b>Motos</b>	0,011	0,89	42,2

Los factores de emisión ponderados mostrados en la tabla anterior se encuentran en general cercanos en el mismo orden de magnitud de los reportados en trabajos previos (pero posteriores al año línea base de este trabajo, 2014) con o sin agrupación de las categorías vehiculares (Ramirez *et al.*, 2019)(Cuéllar Álvarez, 2016); como se muestra en el Anexo A, con algunas diferencias notorias.

Para el PM<sub>2.5</sub> se calcularon la emisiones por resuspensión en base horaria, ver la ecuación 2.2, según recomienda la agencia de protección ambiental (EPA por su sigla en inglés) de los Estados Unidos de América en su Compilation of Air Emissions Factors (EPA, 2011a).

$$E = (k \times (sL)^{0,91} \times (W)^{1,02}) \times \left(1 - \frac{1,2xP}{N}\right) \quad (2.2)$$

$E$  = factor de emisión de partículas (con las unidades de  $k$ ).

$k$  = multiplicador del tamaño de partícula. Para el  $PM_{2.5}$  es 0,15 g/VKT, donde VKT es la sigla en inglés de vehicle kilometer traveled, significa kilómetros recorridos por vehículo.

$sL$  = carga de sedimentos finos por superficie de vía ( $g/m^2$ ), con un valor promedio de 0,1 para Bogotá (Beltran, Belalcazar y Rojas, 2012).

$W$  = masa (toneladas) promedio de todos los vehículos en vía.

$P$  = número de horas con al menos 0,254 mm de precipitaciones durante el periodo a promediar. Se definió el periodo como los 3 últimos días hasta la fecha de los conteos vehiculares.  $P$  fue 2 horas en ambos lugares de simulación.

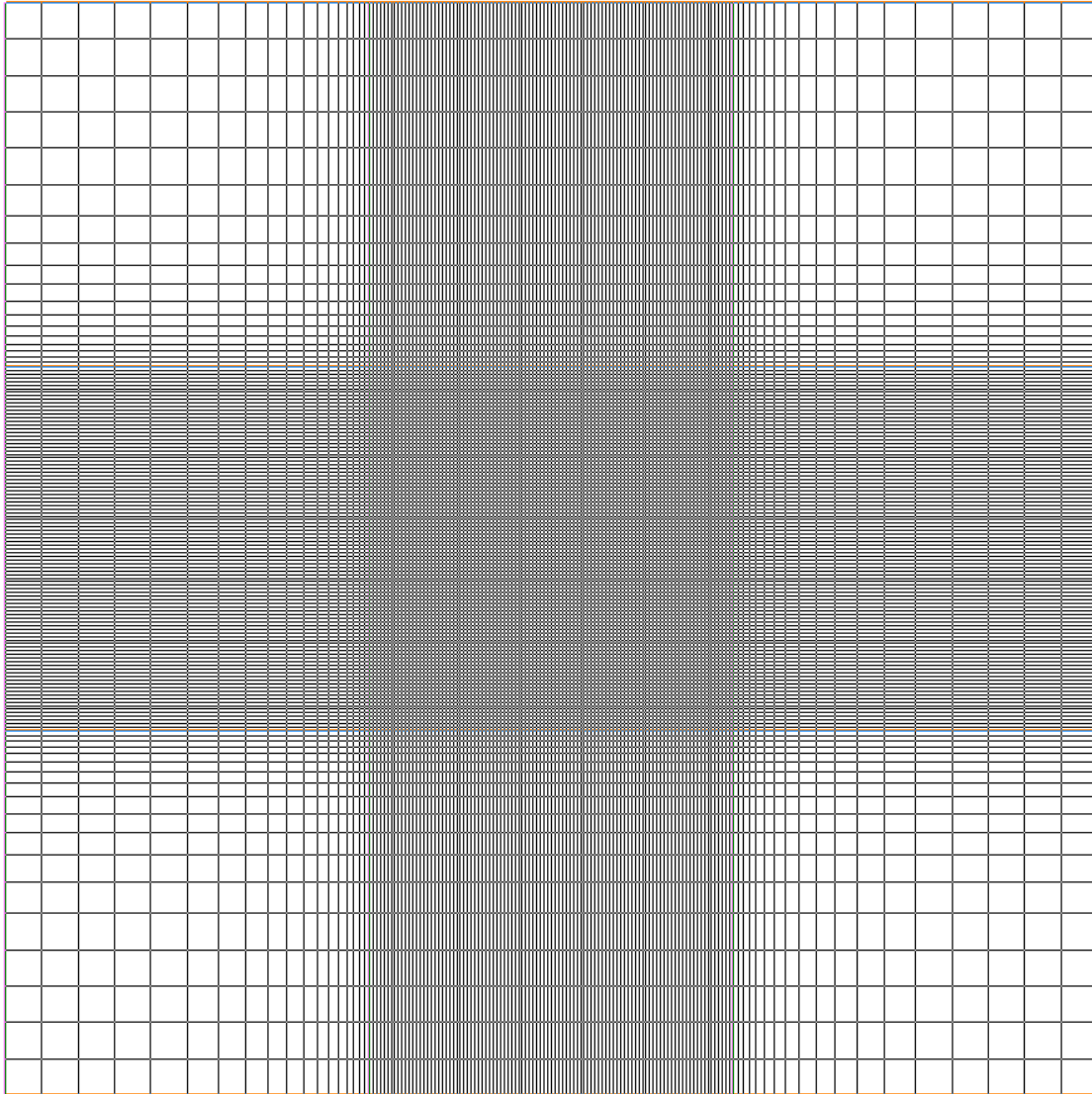
$N$  = número de horas durante el periodo a promediar. Corresponde a 72 h (de 3 días).

Pese a que no es lo recomendado por la EPA, para ser más exacto se tuvo en cuenta en lugar del peso  $W$  promedio de todos los vehículos en vía, el de cada categoría vehicular. Las horas de mayor y menor emisión se escogieron como las dos horas a simular para cada contaminante, en ambos sitios, simulándolas ambas para el escenario línea base. No se muestra el resultado para el CO en el sitio Coliseo para las 7 h, hora de mayor emisión, debido a que el resultado de la simulación era una concentración demasiado alta sin sentido.

### **2.1.3. Construcción del dominio de simulación**

El dominio de simulación escogido fue de 300x300 m con 100 m en el eje z de altura para la estación Calle 100 y de 300 m para la estación Coliseo, con el tamaño de celda mínimo de 1 m en el área central de interés y un alargamiento hasta un máximo de 10 m en la periferia, como se aprecia a continuación:

Figura 2.3: Enmallado utilizado en las simulaciones en WM.

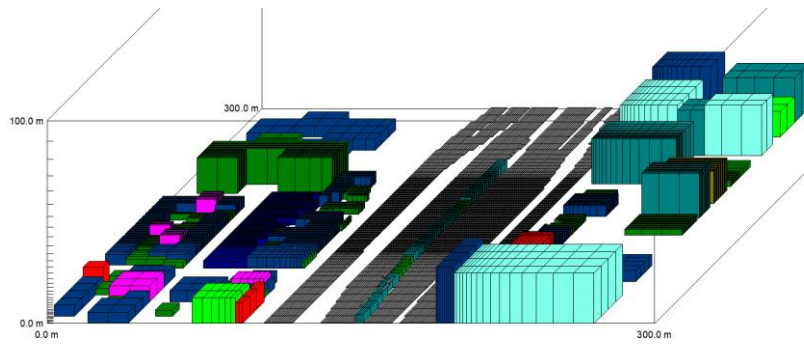


Fuente: Autor.

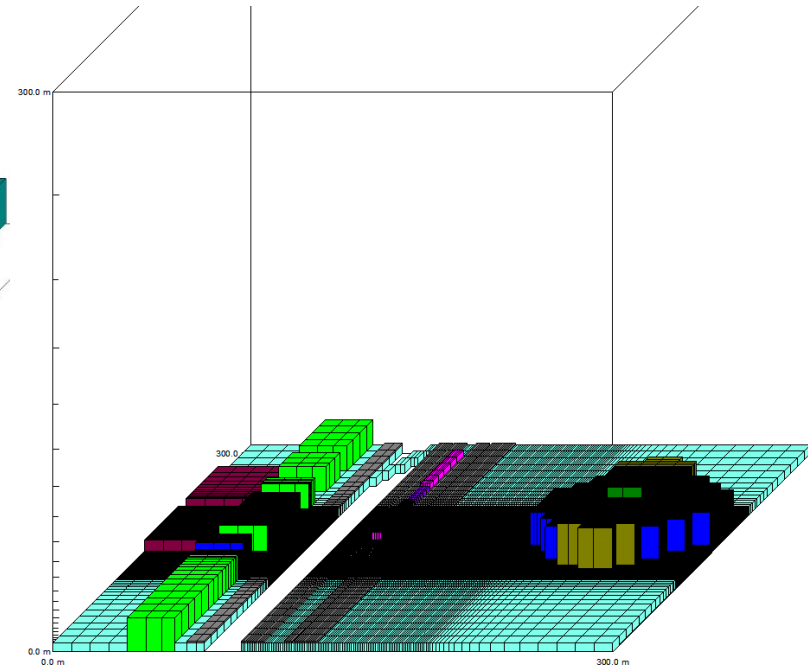
Luego de dibujar (digitalizando) los edificios (en diferentes colores según su altura), se muestra una perspectiva en 3D de la digitalización del dominio con las emisiones (de gris) sobre las calzadas de tránsito, en el caso del Coliseo el dominio está sobre una base de 4,8 m de altura debido a una canalización de agua con dicha profundidad:

Figura 2.4: Una perspectiva en 3D de la digitalización del dominio con las emisiones (de gris) sobre las calzadas de tránsito, para la estación a) Calle 100 y b) Coliseo. No aparecen los árboles.

a)



b)

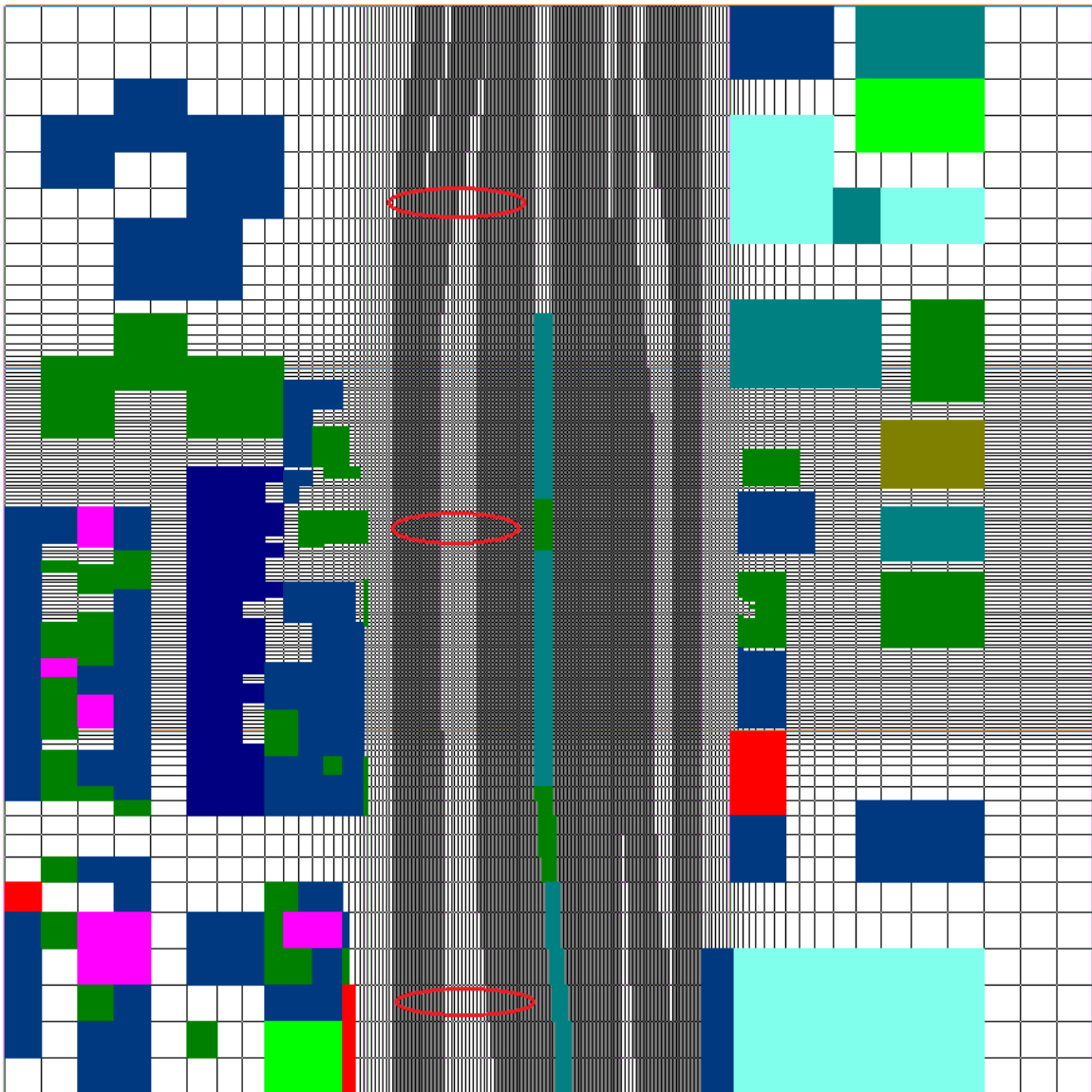


Fuente: Autor.

---

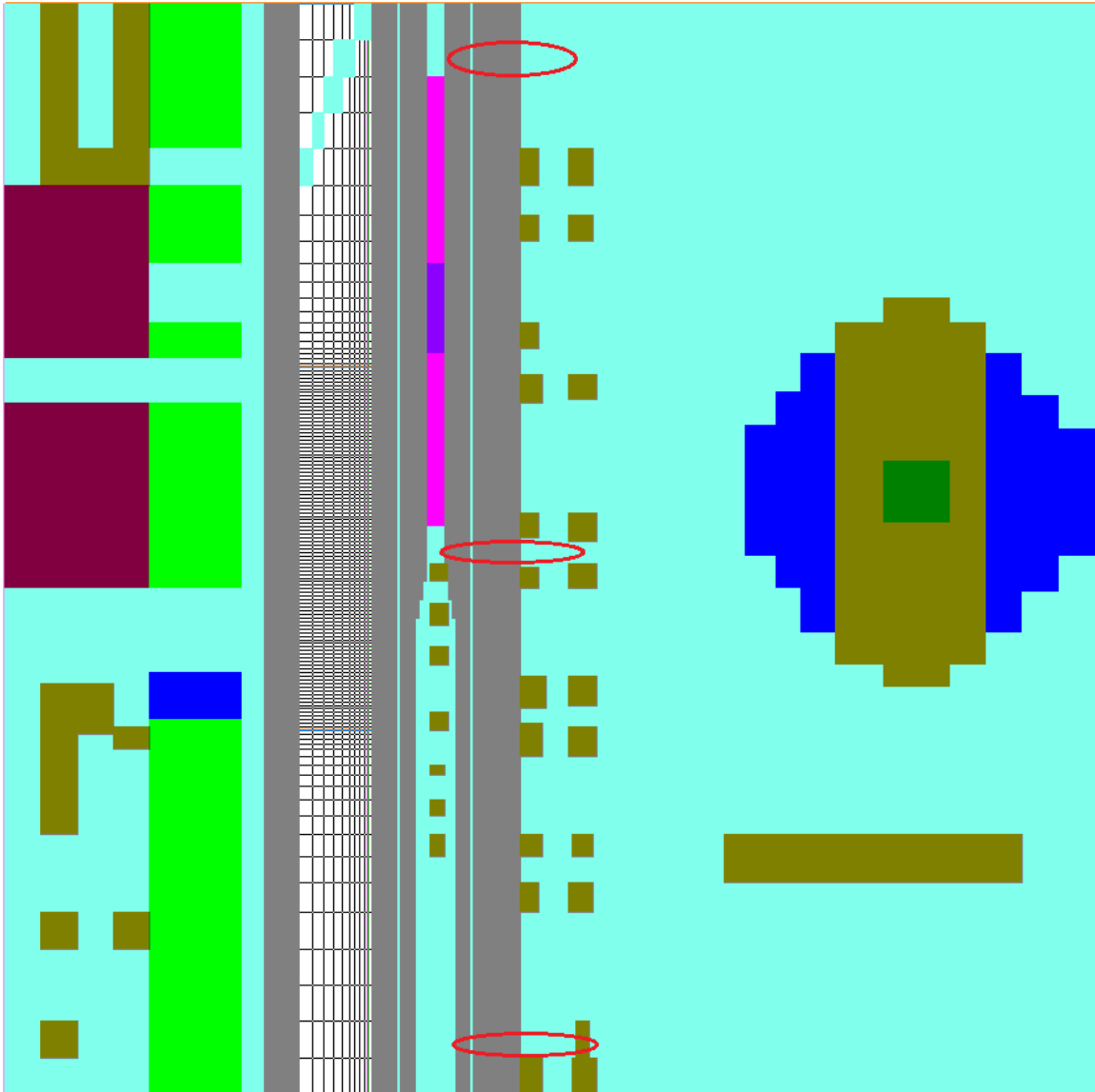
A continuación en las siguientes dos figuras en 2D con vista desde arriba, se muestra dentro del dominio a los árboles en color verde oliva, las vías donde se dan las emisiones en el centro del dominio en gris. Con los sentidos norte-sur y sur-norte al lado izquierdo y derecho respectivamente de la estación (en el centro) de TM, y a ambos lados los edificios en diferentes colores según su altura. Los círculos rojos corresponden a la ubicación de puntos de lectura de las concentraciones simuladas para determinar la exposición en los distintos modos de transporte para la estación Calle 100 y Coliseo que respectivamente se muestran a continuación:

Figura 2.5: Digitalización del dominio para la estación Calle 100, los círculos rojos corresponden a la ubicación de puntos de lectura de las concentraciones simuladas para determinar la exposición en los distintos modos de transporte.



Fuente: Autor.

Figura 2.6: Digitalización del dominio para la estación Coliseo, los círculos rojos corresponden a la ubicación de puntos de lectura de las concentraciones simuladas para determinar la exposición en los distintos modos de transporte.



Fuente: Autor.

#### **2.1.4. Parámetros meteorológicos en la dispersión de contaminantes**

La velocidad y dirección del viento son parámetros determinantes dentro del modelo, a continuación se muestran los valores para cada caso a simular, junto con la altura del anemómetro de la estación de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB), escogida por su cercanía para medir parámetros de fondo (background) para ser simulados en el modelo. Se tuvo en cuenta que la hora reportada en los datos de la RMCAB corresponde al promedio de la hora anterior. Además al haber una inclinación de vía respecto al norte del lugar a modelar se tuvo en cuenta los grados (°) de diferencia al ser ingresados al modelo, según la siguiente condición, con una inclinación de vía, es decir restando 10° para la estación Calle 100 y 5° para la estación Coliseo.

*Si: (Inclinación vía – Dirección del viento RMCAB) < 0°*

*Dirección del viento WM ( ° ) = Dirección del viento RMCAB – Inclinación vía*

Se tomaron siguiendo el mismo criterio de hora también de los reportes de las estaciones de la RMCAB, las concentraciones a las mismas horas de los contaminantes para ser tomados como valores de fondo (background) en los sitios de modelación así:

Tabla 2.2: La hora de los conteos vehiculares, velocidad y dirección del viento (según la inclinación respecto al norte del lugar a modelar) para cada caso a simular, junto con la altura del anemómetro de la estación de la RMCAB. Concentraciones para ser tomadas como valores de fondo (background) en los sitios de modelación. Fuente: Autor y RMCAB.

Ho- ra	Contami- nante	Esta- ción	Estación RMCAB	Tipo de estación	Viento				Concentra- ción ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
					Velocidad (m/s)	Dire- cción (°)	Dirección Modelo (°)	Altura Anemó- metro (m)	
13	PM2.5	Calle 100	Usaquén	De Tráfico	3,6	196	186	19	10,8
20	PM2.5	Calle 100	Usaquén	De Tráfico	2,6	164	154	19	10,0
12	PM2.5	Coliseo	Centro de Alto Rendimiento	De Fondo	3,4	248	243	10	37,4
21	PM2.5	Coliseo	Centro de Alto Rendimiento	De Fondo	0,6	199	194	10	25,0
9	NOx	Calle 100	Usaquén	De Tráfico	2,2	211	201	19	23,1
20	NOx	Calle 100	Usaquén	De Tráfico	2,6	164	154	19	67,7
12	NOx	Coliseo	Centro de Alto Rendimiento	Industrial	3,4	248	243	10	42,9
21	NOx	Coliseo	Centro de Alto Rendimiento	Industrial	0,6	199	194	10	58,4
9	CO	Calle 100	Usaquén	De Fondo	2,2	211	201	19	251,9
18	CO	Calle 100	Usaquén	De Fondo	3,1	160	150	19	211,5
21	CO	Coliseo	Centro de Alto Rendimiento	Industrial	0,6	199	194	10	832,7

Los demás parámetros de entrada fueron los mismos usados por Zamudio (Zamudio, 2016). La baja velocidad del viento para las 7 y 21 h en la estación Centro de Alto Rendimiento, hace que se deba considerar la influencia de la turbulencia inducida por el tráfico, que se puede estimar dentro del cálculos de valores estadísticos que tiene WM. Que en el presente trabajo no pudo ser concluida por falta de información al respecto en el manual y sección de ayuda del software y que no pudo ser facilitada por funcionarios de la empresa Lohmeyer que proporciona dicho programa. En el tipo de estación de tráfico las concentraciones podrían ser más altas que en el de fondo. Cabe anotar que según lo reportado por Guerrero (Guerrero, 2013) en un informe de la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA) de 2012, aparece la estación Las Ferias como de fondo.

## **2.2. Relación de las concentraciones a nivel de calle con la exposición**

Una vez obtenidas las concentraciones a nivel de calle para las ubicaciones de los distintos modos de transporte se puede relacionar la exposición. Para los peatones y biciusuarios es directamente el valor de la concentración del contaminante en sus respectivas ubicaciones. Teniendo en cuenta que solo una fracción de los contaminantes ambiente entra a la cabina de los buses de TM u otro tipo de vehículos, y que en los motociclistas el casco cerrado también ofrece una barrera, aunque menor, los valores de exposición sirven como un indicador de la posible exposición al interior de los vehículos. Como se mencionó anteriormente, es posible utilizar modelos matemáticos para cuantificar la exposición al interior de los vehículos pero dicha estimación está fuera del alcance de este trabajo y se deja como perspectiva para futuros estudios.

## **2.3. Evaluación de estrategias de disminución de la contaminación**

En este trabajo se evaluaron las siguientes estrategias para disminuir la contaminación del aire a nivel de calle. Teniendo en cuenta las emisiones por agrupación vehicular, para cada contaminante criterio de este trabajo y el imperativo de implementación de tecnologías eléctricas de vehículos diversos, al reemplazar tecnologías actuales por eléctricos, no obstante se mantiene en el  $PM_{2.5}$  la resuspensión. En los escenarios con estrategias de disminución de la

contaminación se aplican las siguientes estrategias, enfocadas en las fuentes de contaminación que más afectan (primeras fuentes) cada contaminante, cuyos efectos se muestran más adelante en el capítulo resultados:

Tabla 2.3: Estrategias de disminución de la contaminación de combustión y resuspensión a simular. Fuente: Autor.

<b>E</b>	<b>Estrategia</b>	<b>Contaminante</b>	<b>Disminución</b>
1	Barrido y lavado de las calles (Kryłów y Generowicz, 2019)	PM <sub>2.5</sub> de resuspensión	30%
2	Vehículos livianos y taxis eléctricos	PM <sub>2.5</sub> , CO y NO <sub>x</sub>	100%
3	Buses articulados y biarticulados eléctricos	PM <sub>2.5</sub> , CO y NO <sub>x</sub>	100%
4	Camiones eléctricos	PM <sub>2.5</sub> , CO y NO <sub>x</sub>	100%

Cada estrategia está dirigida a disminuir un contaminante en general o el aporte de determinada categoría vehicular en específico a los contaminantes. Están propuestas teniendo en cuenta estrategias aplicadas en otros países o incluso en Colombia mismo pero en menor escala y su real aplicación implica un esfuerzo tanto del sector público como en el caso de TM y el SITP, como del sector particular en el resto de categorías vehiculares. Lo anterior requiere un proceso de sensibilización a las posibles normas que se expidan en este sentido para su cabal cumplimiento.

### **3. Resultados**

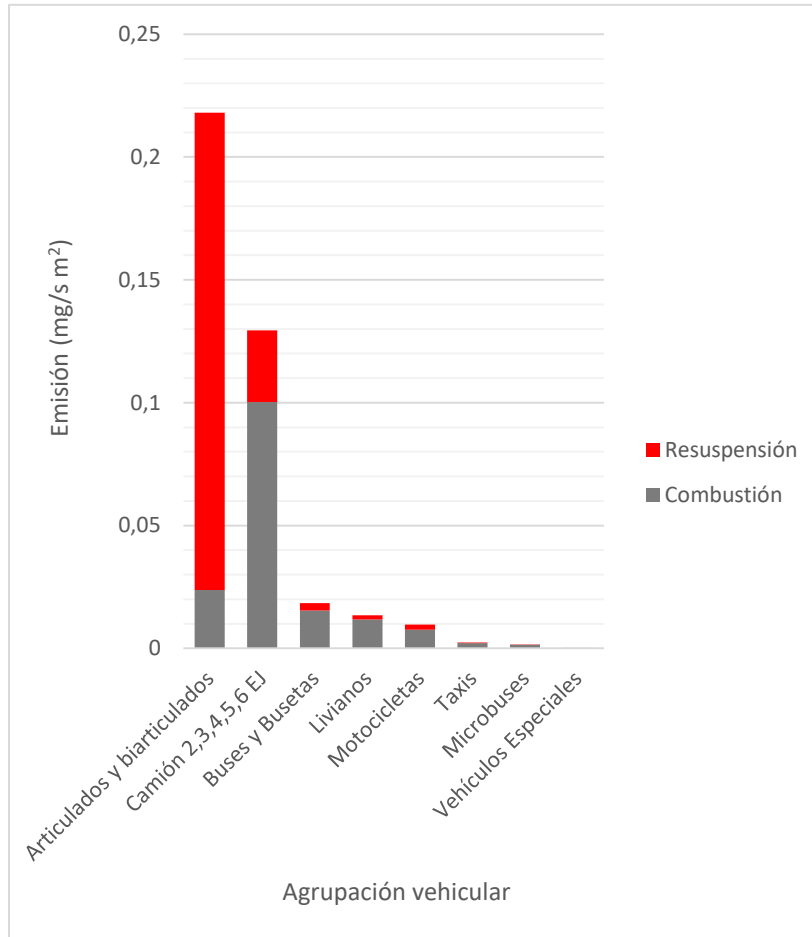
Los sitios modelados en Bogotá fueron los alrededores de la estación de TM Coliseo (hoy en día llamada Movistar Arena) sobre la avenida NQS, partiendo del dominio de simulación realizado por Zamudio (Zamudio, 2016) y de la estación Calle 100 sobre la autopista norte, que presenta un altísimo flujo de pasajeros, con datos (conteos vehiculares, Excel de cálculo de emisiones y hecho por este autor el dominio de simulación) de la APP Bogotá Elektrika (Belalcazar-Cerón *et al.*, 2021). En el trabajo realizado por Zamudio (Zamudio, 2016) se realizó la validación del software CFD WM, con monitoreos en vía. Por su parte en la APP Bogotá Elektrika se hizo una validación con datos monitoreados en vía. Los resultados de esta validación para la misma ubicación de la estación Calle 100 se aprecian en la figura 7 del artículo antes citado, osea (Belalcazar-Cerón *et al.*, 2021). Estos resultados permitieron verificar la idoneidad de los conteos vehiculares recogidos en los días de dicho estudio.

#### **3.1. Emisiones vehiculares**

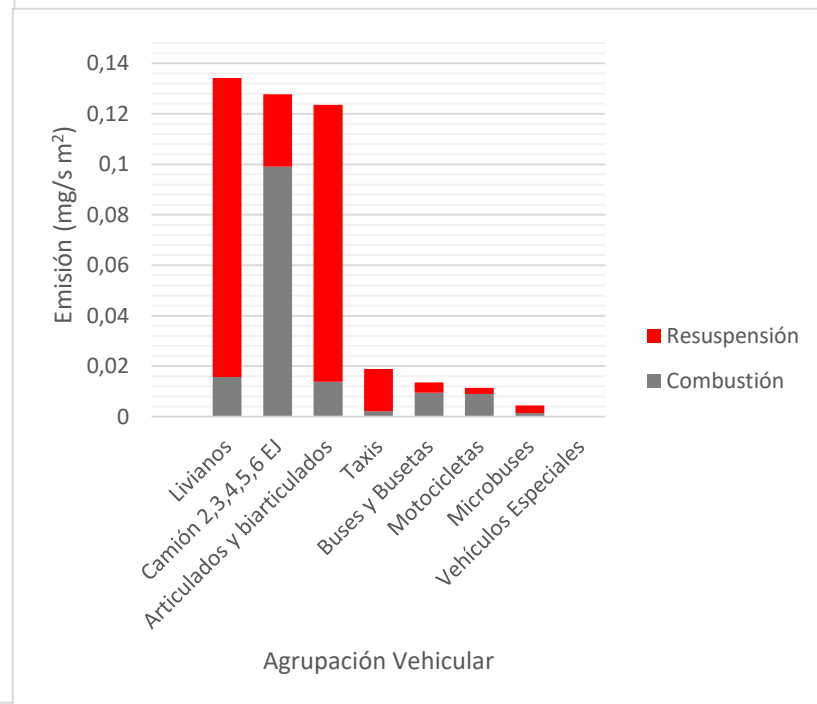
Luego de seguir el procedimiento descrito anteriormente, a continuación se muestran las emisiones vehiculares calculadas para la estación Calle 100 y Coliseo y los contaminantes  $PM_{2.5}$ , CO y  $NO_x$  respectivamente:

Figura 3.1: Emisiones de PM<sub>2.5</sub> por agrupación vehicular en la estación a) Calle 100 y b) Coliseo.

a)



b)

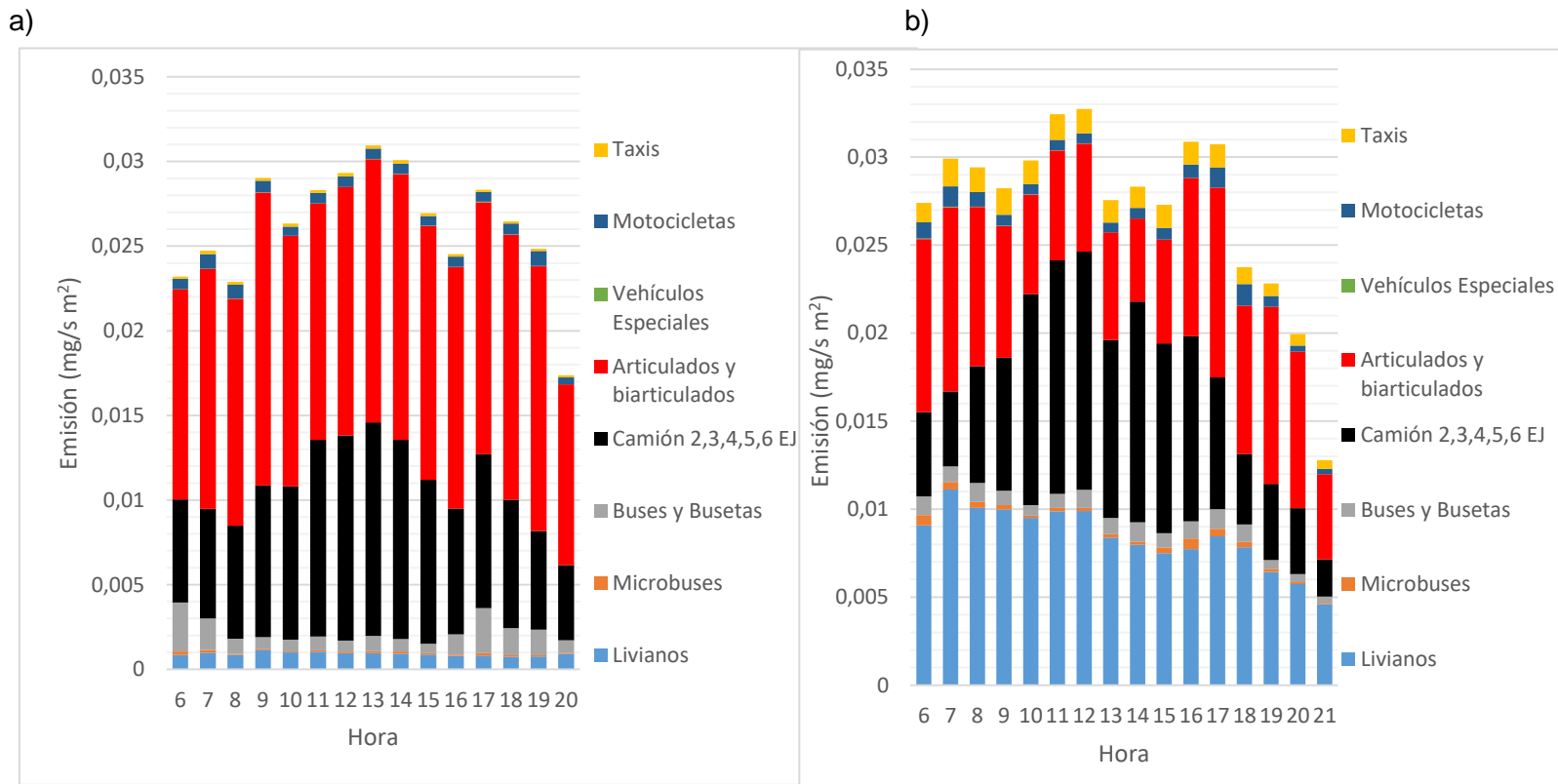


Fuente: Autor.

En las figuras anteriores se observa que dentro de las agrupaciones vehiculares, buses de TM articulados y biarticulados y por el otro lado livianos, en la a) estación Calle 100 y b) estación Coliseo, respectivamente, tienen el mayor aporte a las emisiones de  $PM_{2.5}$  (seguidos de los camiones) debido a la resuspensión en los buses de TM y livianos que aporta más que la combustión. Esto indica que se deben hacer esfuerzos en la reducción de esta resuspensión y combustión. Para la resuspensión que fue de alrededor del 60% (cercano al 67% para la ciudad en 2020) es posible barrer y lavar las calles y para la combustión un cambio de tecnología.

También se aprecia que los buses de TM articulados y biarticulados son con bastante diferencia la agrupación vehicular de mayor aporte de emisiones considerando ambos lugares (estaciones) seguida de los camiones. Aquí los esfuerzos deben estar enfocados en buses de TM, camiones y livianos con menor emisión o eléctricos preferiblemente. En general se observan mayores emisiones por escaso margen en la estación Coliseo que en la Calle 100. En las figuras siguientes se observa levemente que las mayores emisiones se dan en el medio día.

Figura 3.2: Emisiones de PM<sub>2.5</sub> por hora en la estación a) Calle 100 y b) Coliseo.



Fuente: Autor.

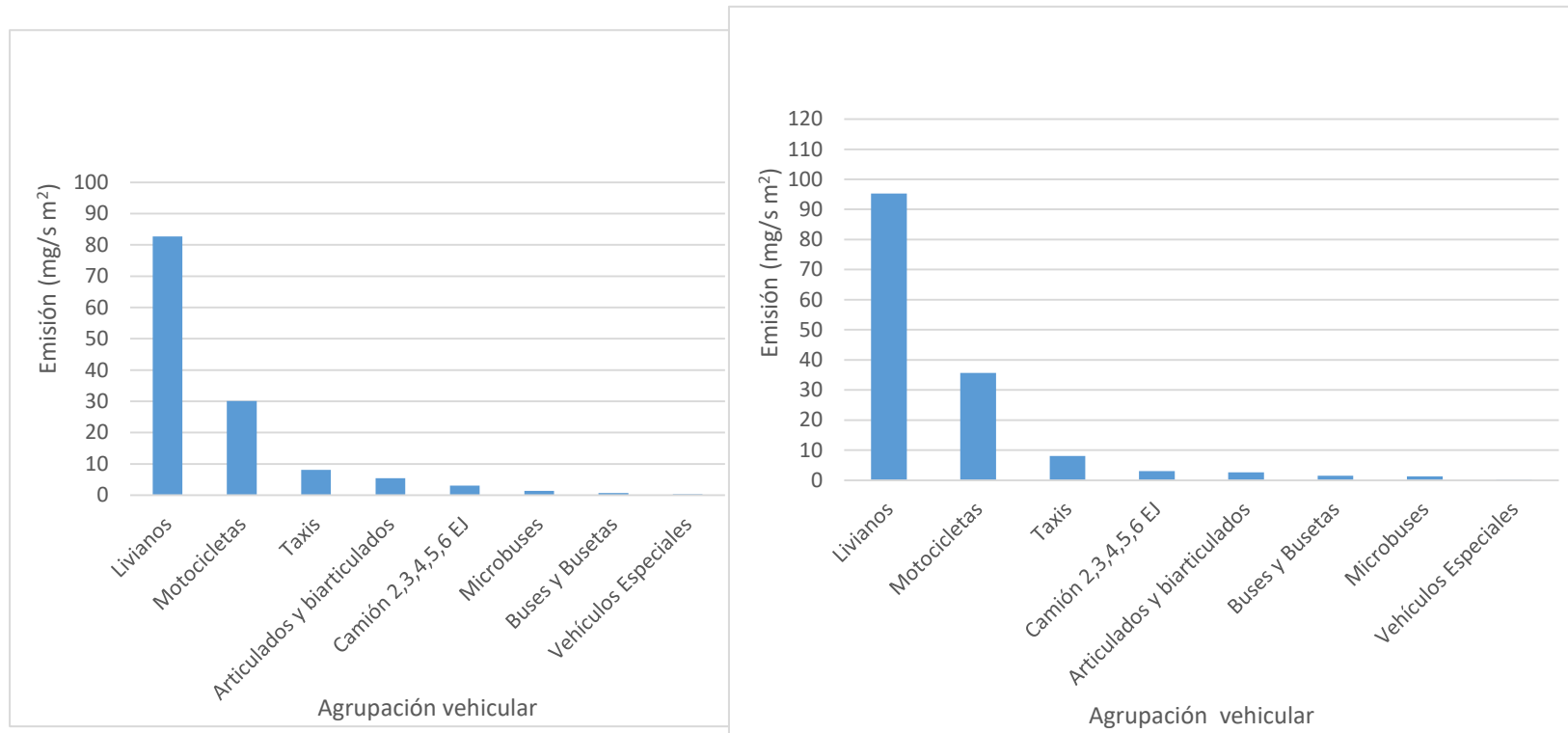
Como se decía anteriormente, hay una tendencia de las mayores emisiones de PM<sub>2.5</sub> hacia el mediodía. Es llamativo que la hora pico de movilización entre 6 y 8 h (a.m.) no esté dentro de estos mayores valores y como era de

esperarse los menores valores se dan desde las 20 h (8 p.m.), cuando baja el flujo vehicular pues gran parte de los usuarios de los vehículos han retornado a casa. Para la a) estación Calle 100 los buses articulados y biarticulados de TM son claramente los mayores aportantes, mientras en la b) estación Coliseo los valores son cercanos liderando los livianos y camiones en ese orden. Para la a) estación Calle 100 es llamativo que la categoría vehicular de camiones tiene un aumento en sus emisiones hacia el mediodía, lo que genera que sean las horas de mayores emisiones para este lugar; de manera análoga sucede lo mismo para las 11 a.m. y 12 m. en la b) estación Coliseo.

Figura 3.3: Emisiones de CO por agrupación vehicular en la estación a) Calle 100 y b) Coliseo.

a)

b)

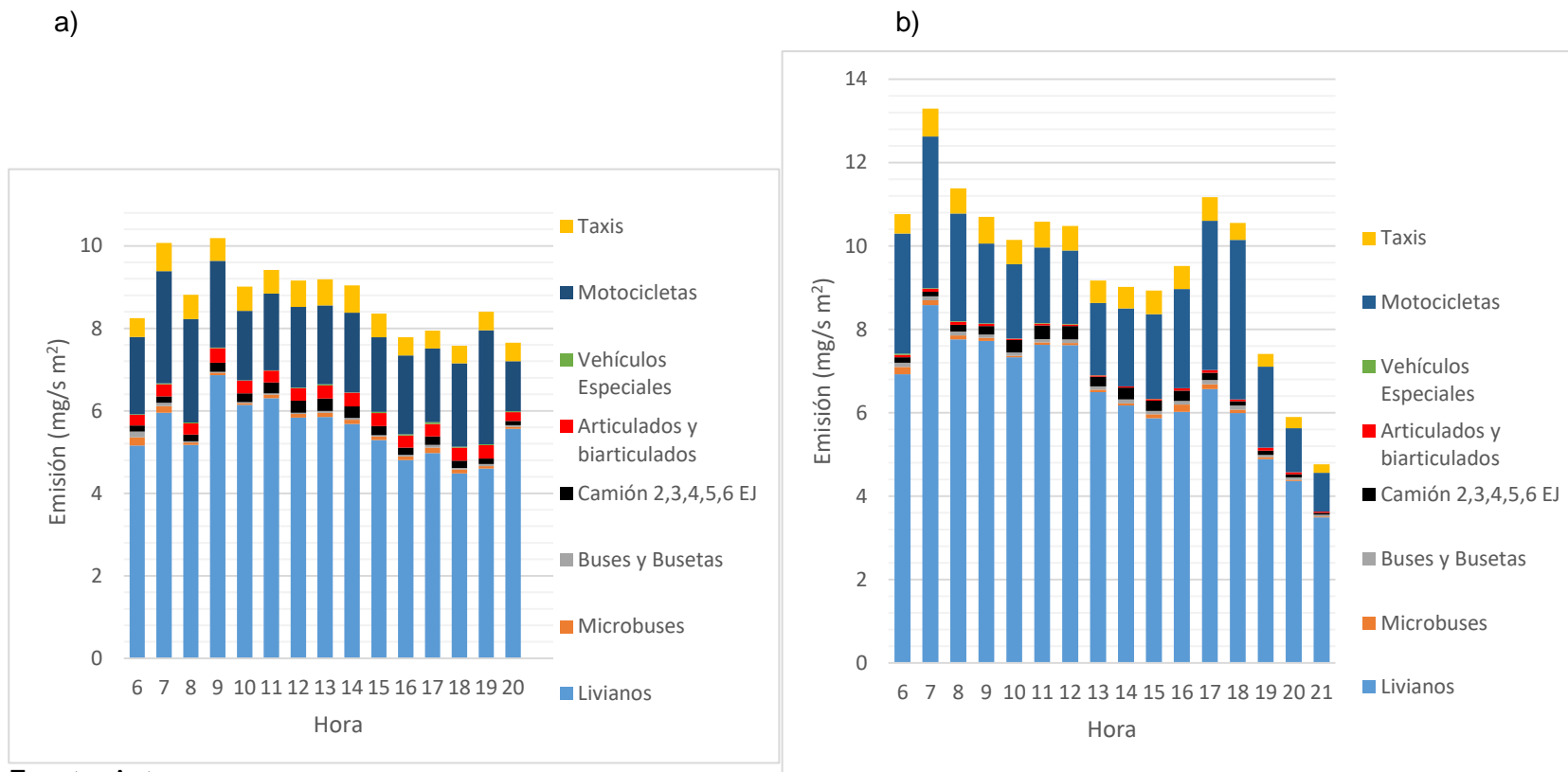


Fuente: Autor.

Para el CO las mayores emisiones con bastante diferencia son de la agrupación vehicular livianos, están seguidas por las de las motocicletas, como era de esperarse, a las que sobrepasa por más del doble de su valor. Estos primeros representan con representativa diferencia mayores emisiones en b) estación Coliseo que en a) estación Calle 100. En ambas estaciones el tercer lugar lo ocupan los taxis que son de características similares a los livianos pero con menor factor de emisión y flujo vehicular.

Para este contaminante se debe enfocar una estrategia de disminución para los livianos, que sean eléctricos en lo posible. En general se observan mayores emisiones en la estación Coliseo que en la Calle 100.

Figura 3.4: Emisiones de CO por hora en la estación a) Calle 100 y b) Coliseo.

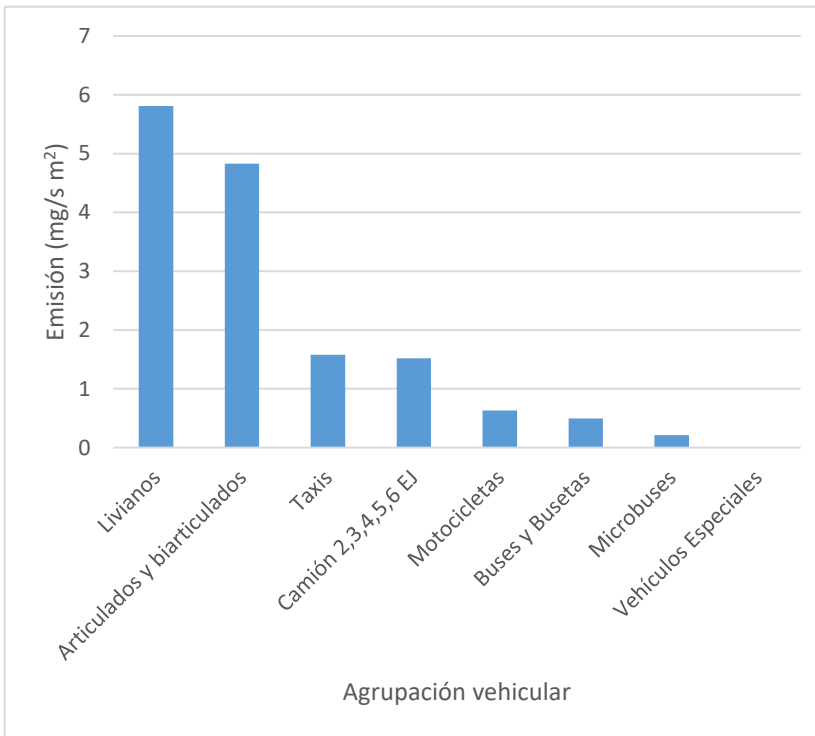


Fuente: Autor.

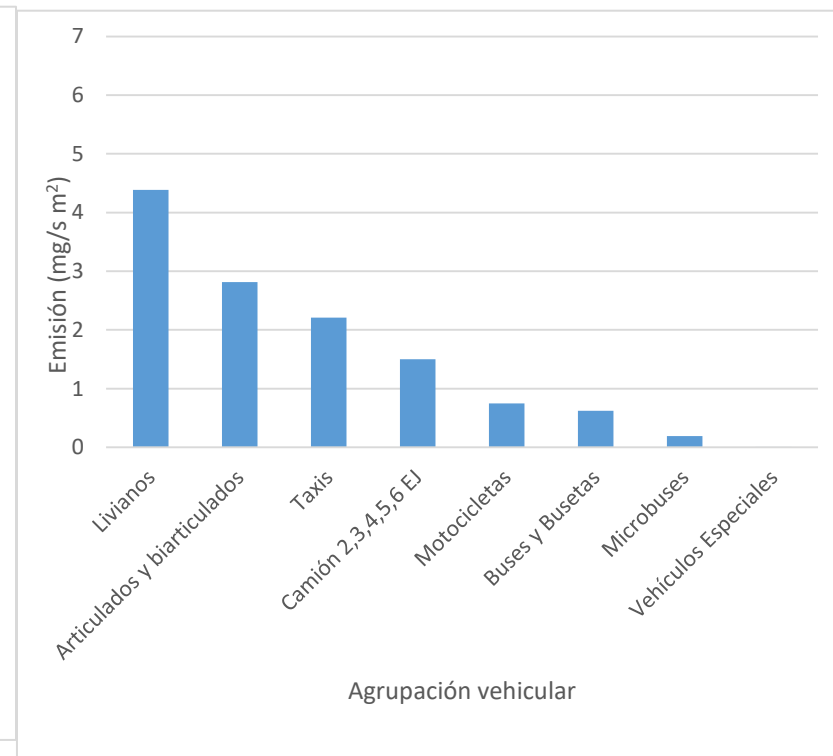
Para el CO las mayores emisiones están temprano en la mañana desde las 7 (h) a.m. con altos valores hasta el mediodía, gracias al aporte de categorías vehiculares como los livianos que ocupan el primer lugar con bastante diferencia y las motocicletas en segundo lugar. Mientras que los buses articulados y biarticulados de TM y los camiones tienen aportes muy pequeños como era de esperarse para este contaminante, al tener menores factores de emisión y menor flujo vehicular. Como era de esperarse los menores valores se dan desde las 20 h.

Figura 3.5: Emisiones de NO<sub>x</sub> por agrupación vehicular en la estación a) Calle 100 y b) Coliseo.

a)



b)

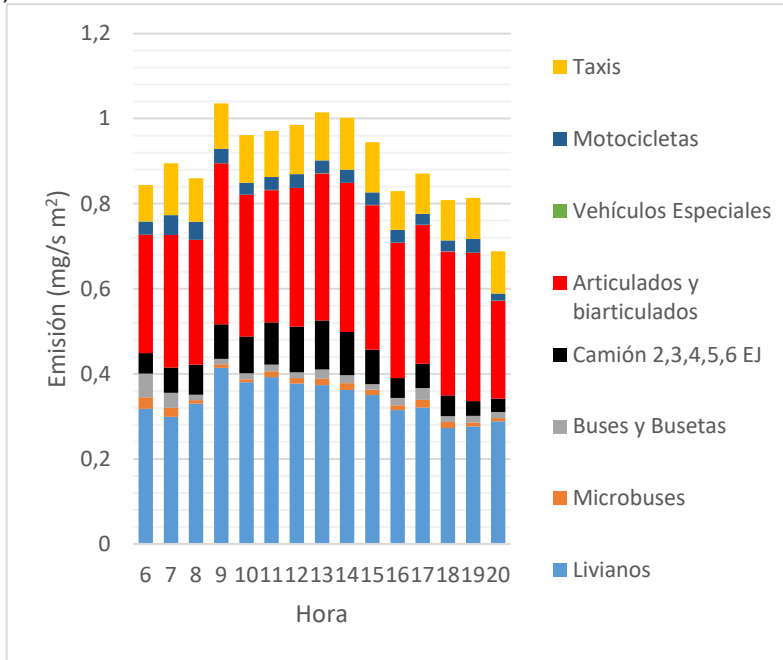


Fuente: Autor.

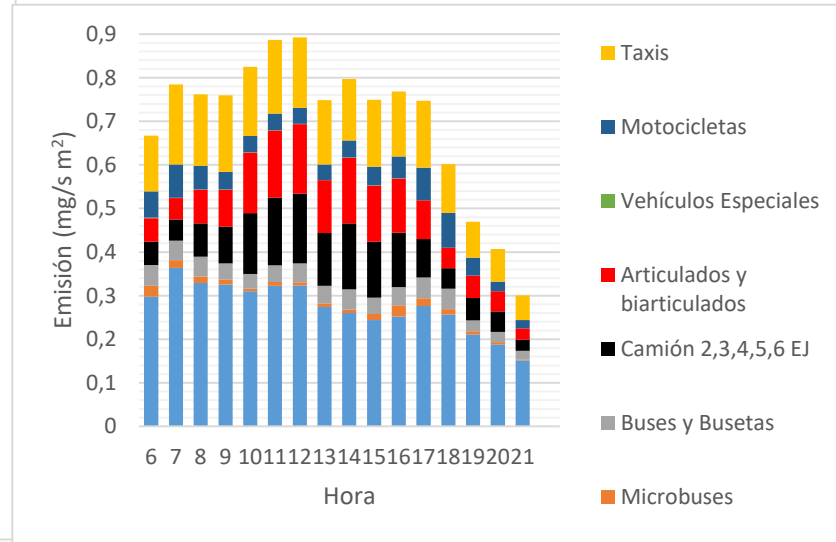
Esta vez en las emisiones de  $\text{NO}_x$ , la categoría livianos está seguida por la de buses articulados y biarticulados de TM y de los taxis, y de los camiones en cuarto lugar en ambas ubicaciones, con una ventaja pequeña en la estación a) Calle 100 de los primeros respecto a los segundos. Esto nos muestra que ambas dos primeras categorías deben tener reducciones en sus emisiones directas, con la adquisición de vehículos eléctricos. Es llamativo que también los taxis superen así sea por poco a los camiones en emisiones, esto debido a un mayor flujo vehicular pese a tener menor factor de emisión. En general se observan mayores emisiones por pequeña diferencia en la estación Calle 100 que en la Coliseo.

Figura 3.6: Emisiones de NO<sub>x</sub> por hora en la estación a) Calle 100 y b) Coliseo.

a)



b)



Fuente: Autor.

Aquí en la distribución horaria se ve una tendencia de incremento de emisiones hacia el mediodía, con excepción de las 9 h (a.m.) y 13 h (1 p.m.) en la Calle 100 y Coliseo respectivamente. Esta tendencia de mayores emisiones hacia el mediodía se debe tener en cuenta por parte de las autoridades ambientales para aplicar medidas más específicas a las existentes actualmente que abarcan todo el día, indistintamente de la mayor contaminación que existe a determinadas horas como se ha visto en estos casos para distintos contaminantes y lugares de la ciudad. De nuevo, como era de esperarse los menores valores se dan desde las 20 h (8 p.m.).

La agrupación vehicular livianos, que incluye automóviles con camperos y camionetas, es con bastante diferencia el principal emisor de CO y NO<sub>x</sub> en las estaciones de TM de la Calle 100 y Coliseo; también genera el mayor aporte a la emisión de ambos gases (CO y NO<sub>x</sub>) en los inventarios de emisiones para toda la ciudad del año 2014 (SDA, 2020), por lo tanto debe tener importantes estrategias de disminución de la contaminación a ser simuladas. Los buses articulados y biarticulados de TM lo son (principal emisor) de PM<sub>2.5</sub> con excepción de PM<sub>2.5</sub> en la estación Coliseo en donde los livianos lideran por poco seguidos de los camiones.

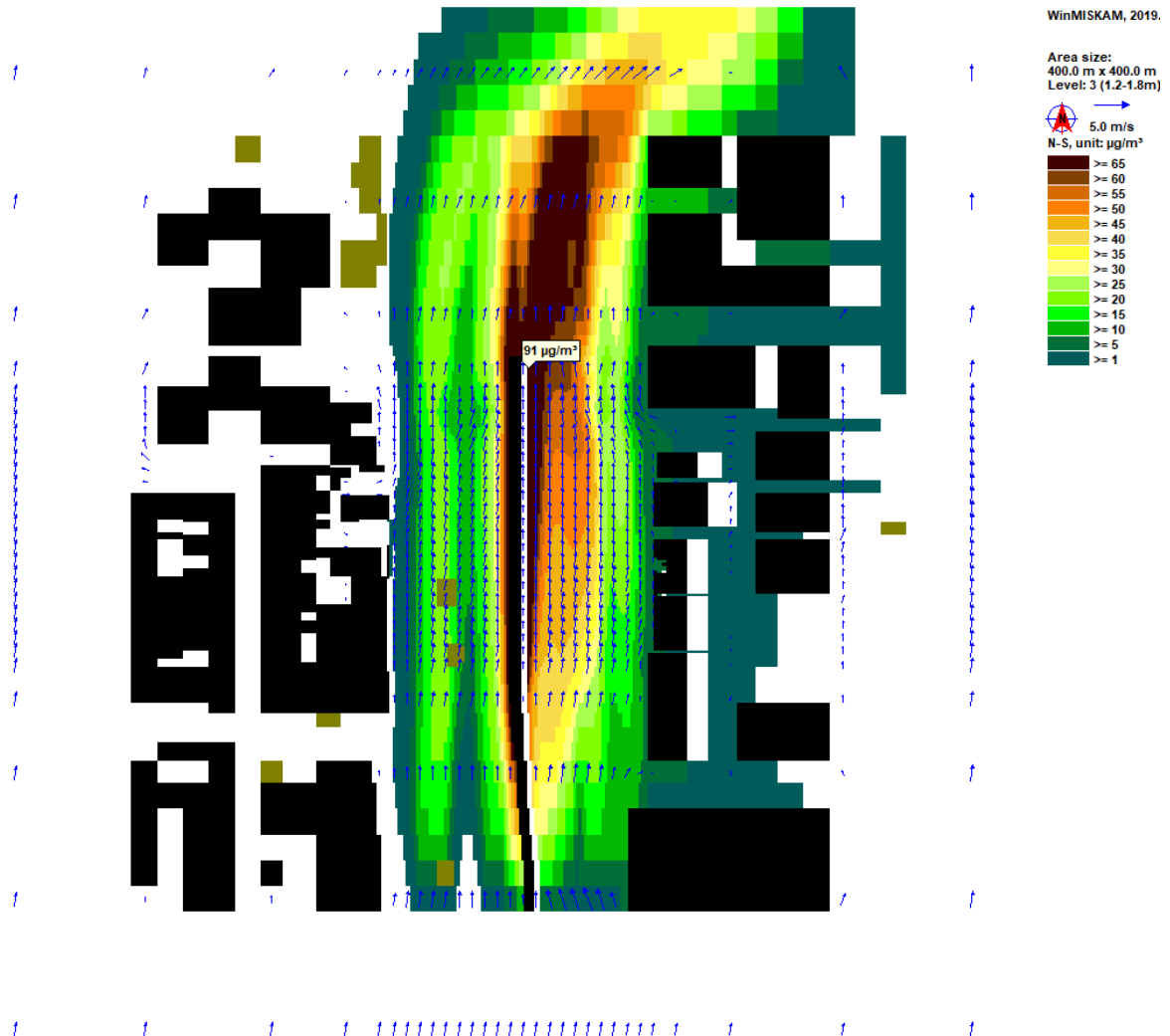
En el caso de la resuspensión de PM<sub>2.5</sub> los buses articulados y biarticulados de TM tienen gran aporte (el mayor) y también deben ser reducidos, por otro lado los camiones tienen gran cantidad de emisiones directas y a pesar de horarios de restricción en su tránsito dado que no hay otra alternativa, para el transporte de gran carga en la ciudad, se hace difícil reducir este aporte en el total sin los incentivos suficientes para tener camiones eléctricos. En general se observan mayores emisiones en la estación Coliseo que en la Calle 100 excepto para NO<sub>x</sub>. En el anexo B se muestran las emisiones tras las estrategias de disminución.

### **3.2. Concentraciones de simulaciones con WinMiskam**

Las simulaciones en WM se realizan en dos etapas, en la primera (un poco más demorada) se genera un mapa de vientos con la velocidad y dirección del viento que luego sirven como parámetros de entrada al dominio. La segunda etapa toma el mapa de vientos y con las emisiones se genera la dispersión de los contaminantes en concentraciones. Las

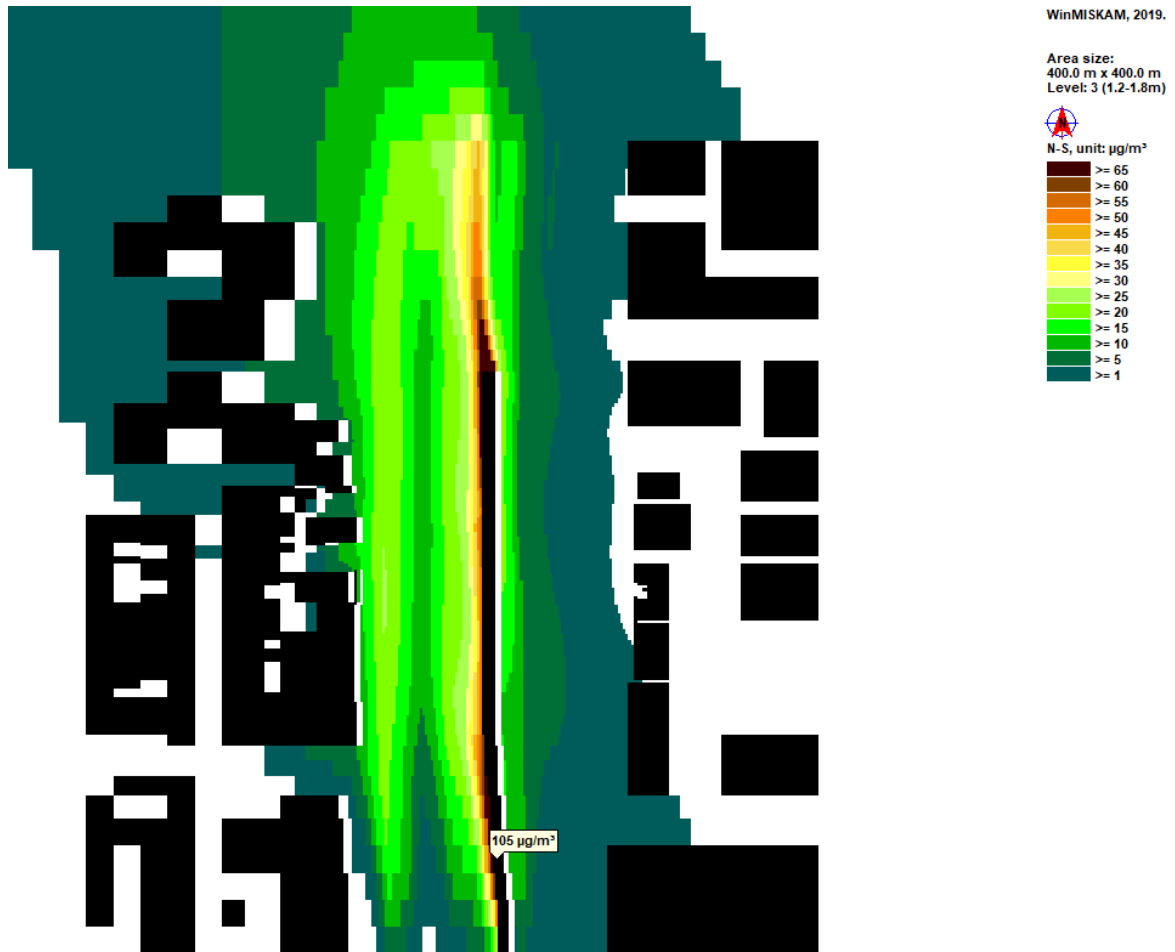
---

simulaciones tardan casi 1 h cada una, con un procesador Intel i7 y 6 GB de memoria RAM. En los resultados gráficos de las simulaciones se muestra dentro del dominio a los edificios en color negro, los árboles en color verde oliva, con vectores de velocidad de viento (flechas azules), el punto y valor de mayor concentración; a continuación las figuras de las concentraciones obtenidas a una altura entre 1,2 y 1,8 m para la estación Calle 100, rango dentro del cual está ubicado el triángulo respiratorio (Franco Gantiva, 2014). En la estación Coliseo el dominio está sobre una base de 4,8 m de altura debido a una canalización de agua con dicha profundidad, entonces se suman las dos alturas para un valor entre 5,5 y 6,4 m equivalente al rango 0,7-1,6 m de altura sobre el suelo. Los siguientes resultados no incluyen las concentraciones de fondo (background) por lo que los valores definitivos son mayores en los valores mostrados previamente en la tabla 2.2; primero se muestran los resultados en el escenario de línea base. Para el CO en la hora de máxima emisión en la estación Coliseo se obtuvieron concentraciones por encima de lo normal entonces no se reporta:

Figura 3.7: Estación Calle 100, PM<sub>2.5</sub> a las 13 h en escenario de línea base.

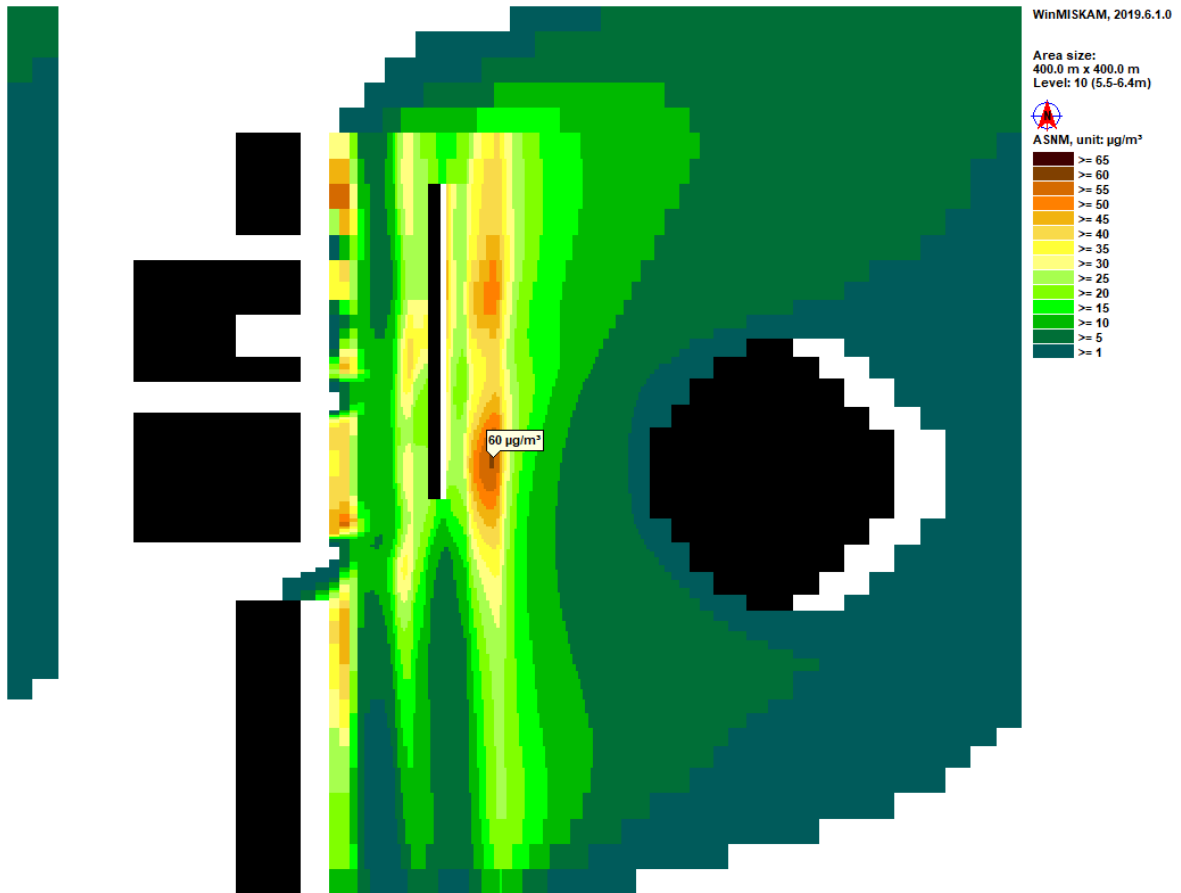
Fuente: Autor.

En la figura anterior de PM<sub>2.5</sub>, a las 13 h se observa un sobrepaso del valor recomendado de concentración en 24 h, principalmente en la parte superior derecha de las vías, en el sentido sur-norte en la calzada exclusiva de TM y la rápida mixta. Donde se tienen valores que sobrepasan los 50 µg/m<sup>3</sup> para un día de exposición que recomienda la norma. Se tiene un valor máximo de 91 µg/m<sup>3</sup> al lado de la estación de TM.

Figura 3.8: Estación Calle 100, PM<sub>2.5</sub> a las 20 h en escenario de línea base.

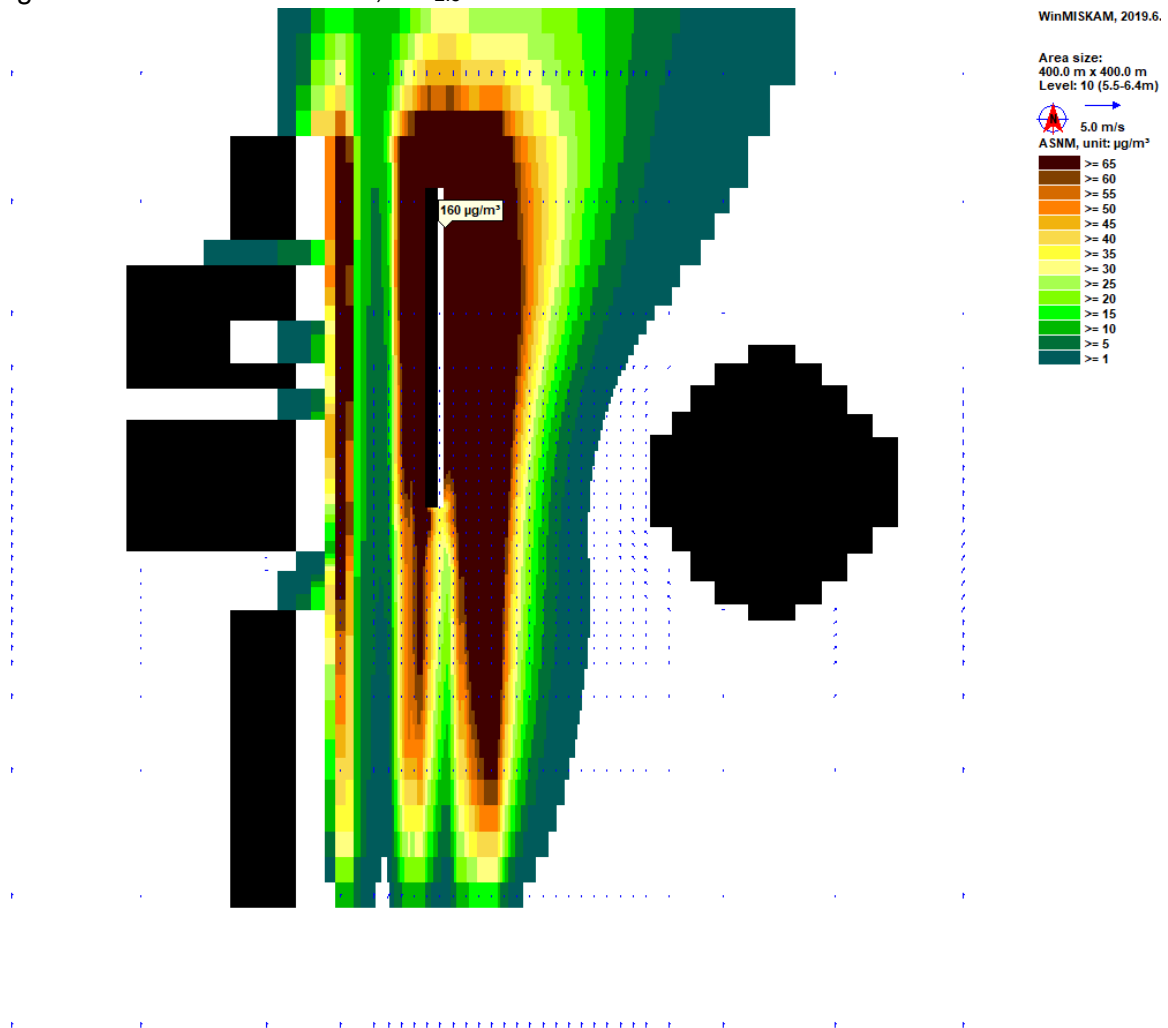
Fuente: Autor

En la figura anterior que está para las 20 h se observa en general una menor concentración a la recomendada para concentración en un día, como era de esperarse para una hora de menor flujo vehicular que la anterior. Pero se tiene un mayor pico de concentración de 105 µg/m<sup>3</sup>, como para las 13 h, también justo al lado de la estación de TM pero en el otro lado. En las últimas 2 figuras la velocidad y dirección del viento es relativamente cercana, pero en la última dirección seguramente no favorece la dispersión en el punto del pico.

Figura 3.9: Estación Coliseo, PM<sub>2.5</sub> a las 12 h en escenario de línea base.

Fuente: Autor.

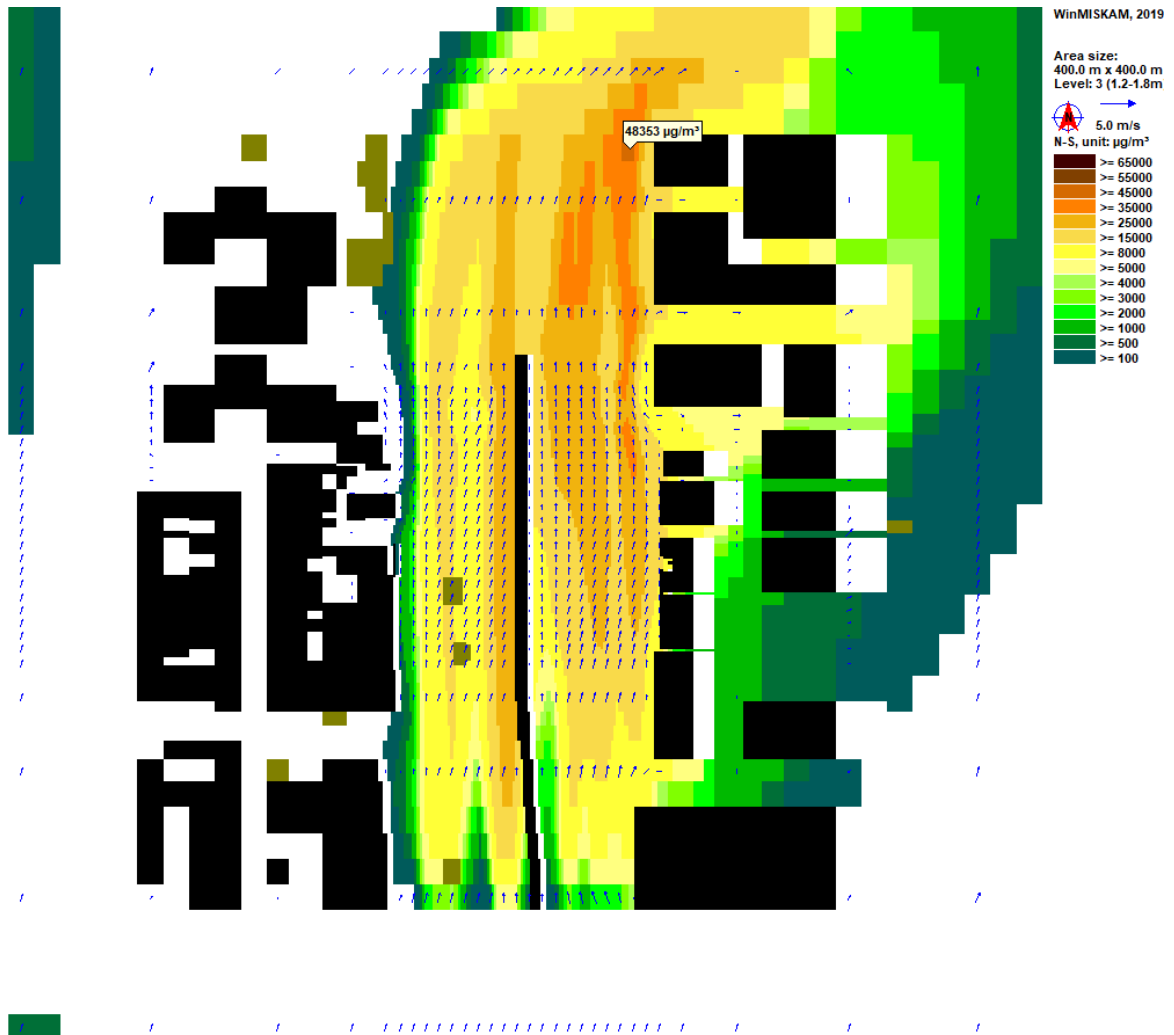
Para la estación Coliseo se aprecia a las 12 h valores en la calzada sur-norte por encima de lo recomendado para la exposición en un día y también cerca del andén de la calzada norte-sur. El pico máximo de concentración es en la calzada mixta sur-norte, de 60 µg/m<sup>3</sup>. El andén de la calzada sur-norte al ser un espacio abierto, refleja bajas concentraciones.

Figura 3.10: Estación Coliseo, PM<sub>2.5</sub> a las 21 h en escenario de línea base.

Fuente: Autor.

En la figura anterior para las 21 h se observa una gran concentración de contaminante en ambos sentidos de la vía. El pico máximo de concentración es de  $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$  siendo por bastante diferencia superior a lo recomendado para la exposición en un día. Lo anterior se puede deber, a que para esta hora se tiene una velocidad del viento bastante baja respecto a la hora anterior, teniendo una menor dispersión de los contaminantes en el aire.

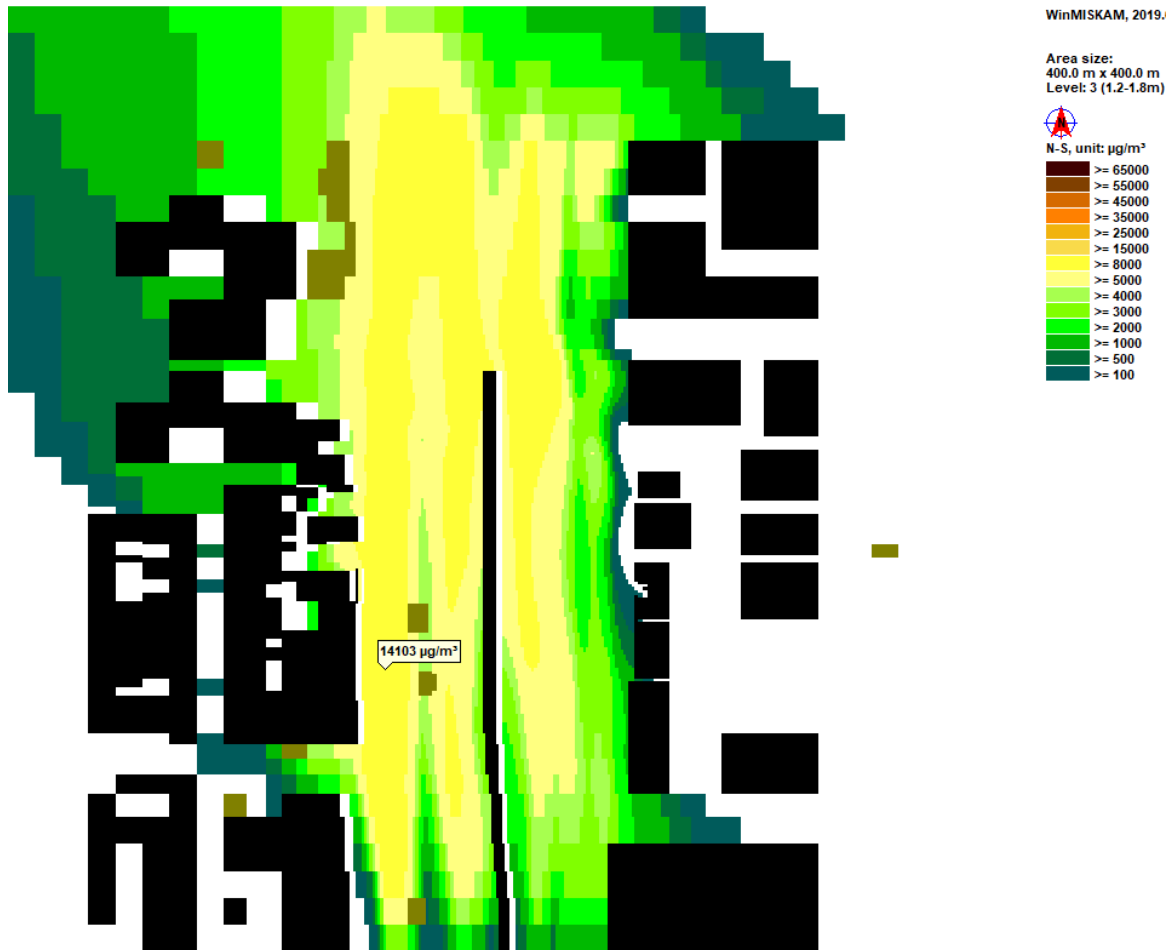
Figura 3.11: Estación Calle 100, CO a las 9 h en escenario de línea base.



Fuente: Autor.

En la figura anterior para el CO en la Calle 100 a las 9 h, se observa como en la parte superior derecha de las vías, en la calzada rápida y lenta en el sentido sur-norte se tiene una mayor concentración a la recomendada para una hora de 40.000 µg/m³. El pico máximo de concentración es de 48.353 µg/m³. En general en toda la vía se observa que se supera el límite recomendado de concentración para 8 horas de 10.000 µg/m³.

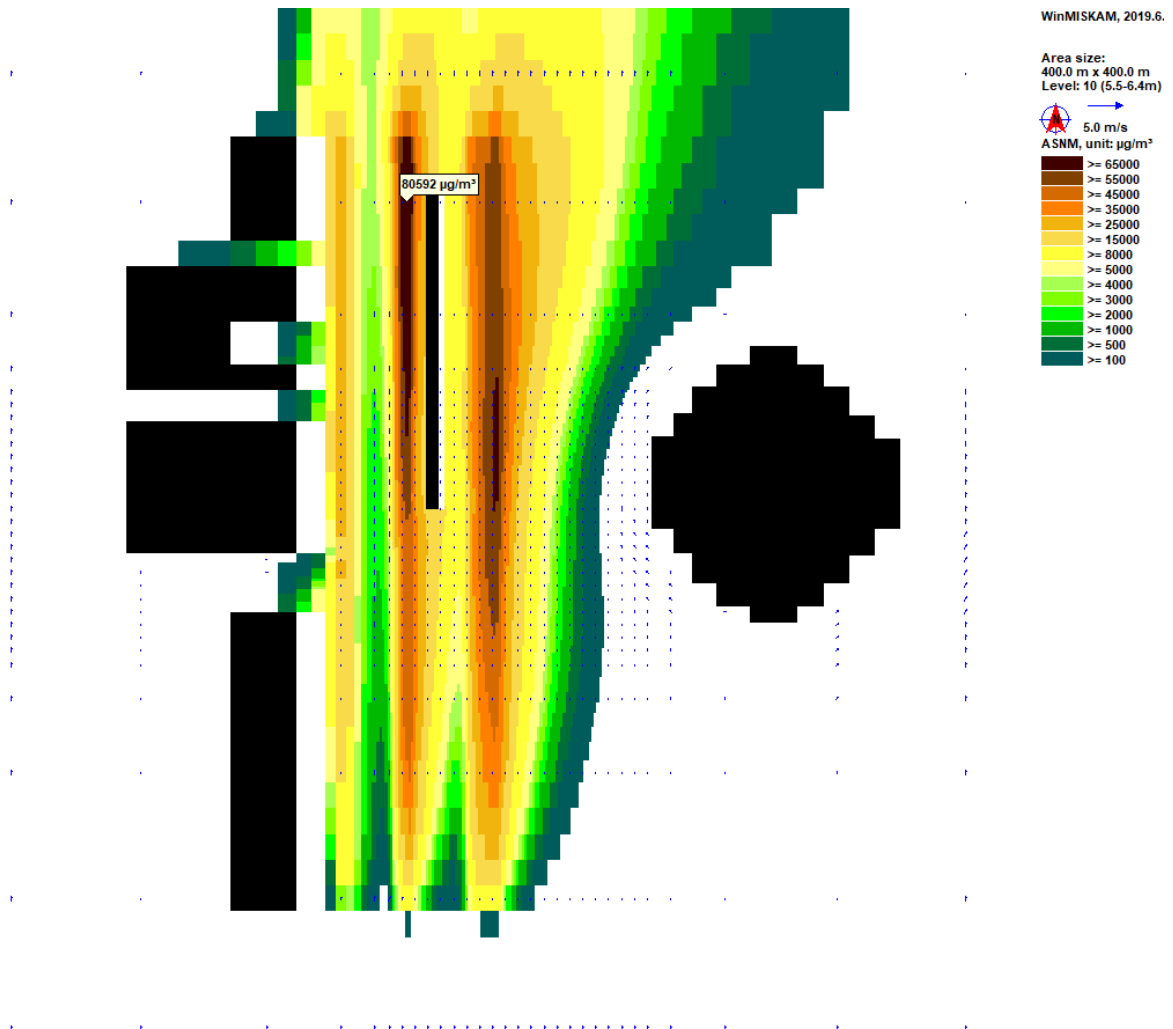
Figura 3.12: Estación Calle 100, CO a las 18 h en escenario de línea base.



Fuente: Autor.

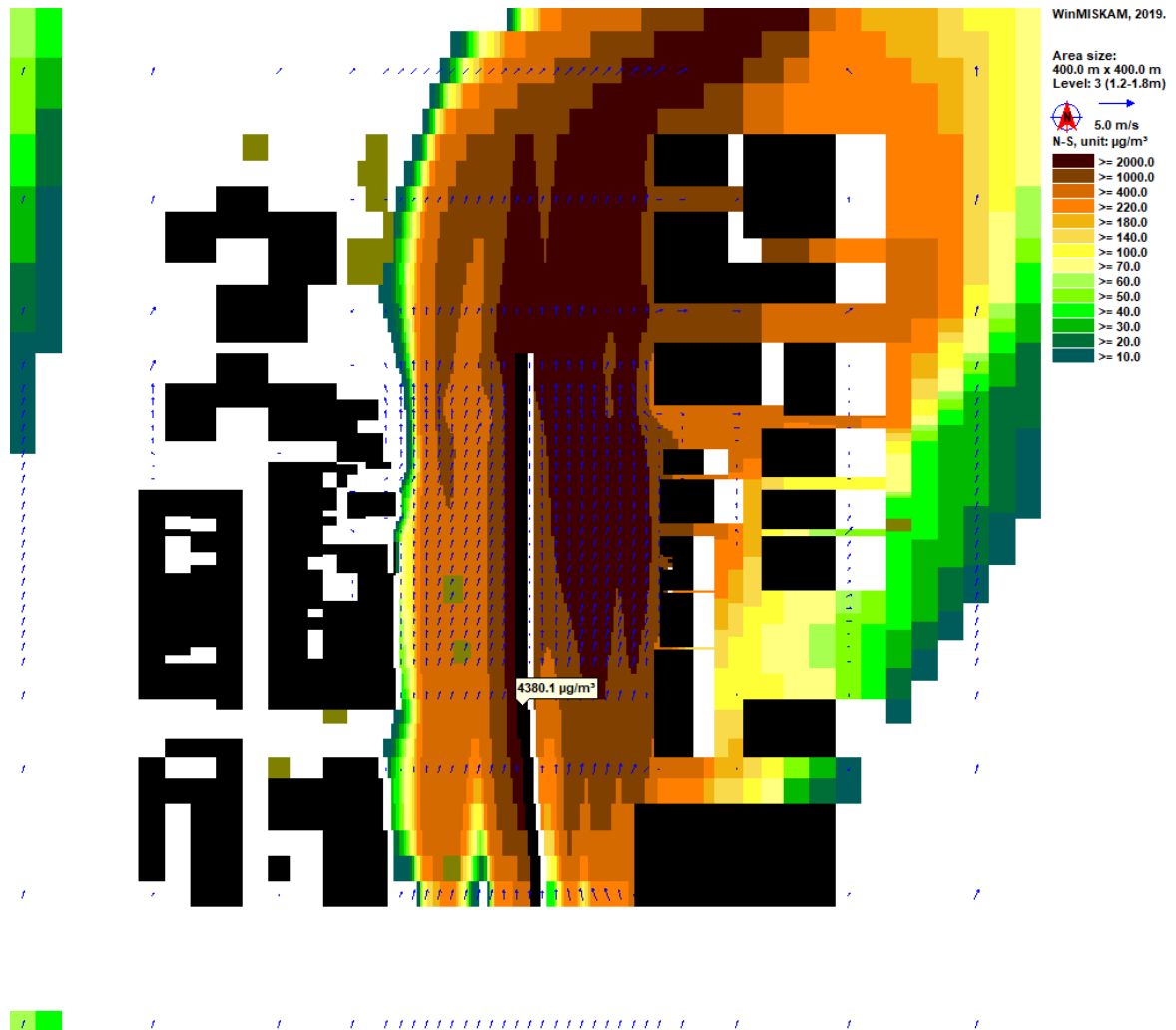
El anterior figura para la estación Calle 100 a las 18 h, se observa como el pico máximo de concentración de 14.103  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , que está bastante por debajo del límite máximo recomendado para concentración de una hora de 40.000  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Además de ser una hora con menor flujo vehicular, cuenta con una mayor velocidad del viento respecto a la de las 9 h, lo cual favorece la mayor dispersión de los contaminantes y las bajas concentraciones.

Figura 3.13: Estación Coliseo, CO a las 21 h en escenario de línea base.



Fuente: Autor.

El anterior figura se observa cómo a ambos sentidos de la vía se observan concentraciones superiores a los  $40.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$  recomendados para exposición por una hora. El pico máximo de concentración es de  $80.592 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y se presenta en el sentido norte-sur de la vía teniendo que ver que la velocidad del viento a esta hora es bastante baja.

Figura 3.14: Estación Calle 100, NO<sub>x</sub> a las 9 h en escenario de línea base.

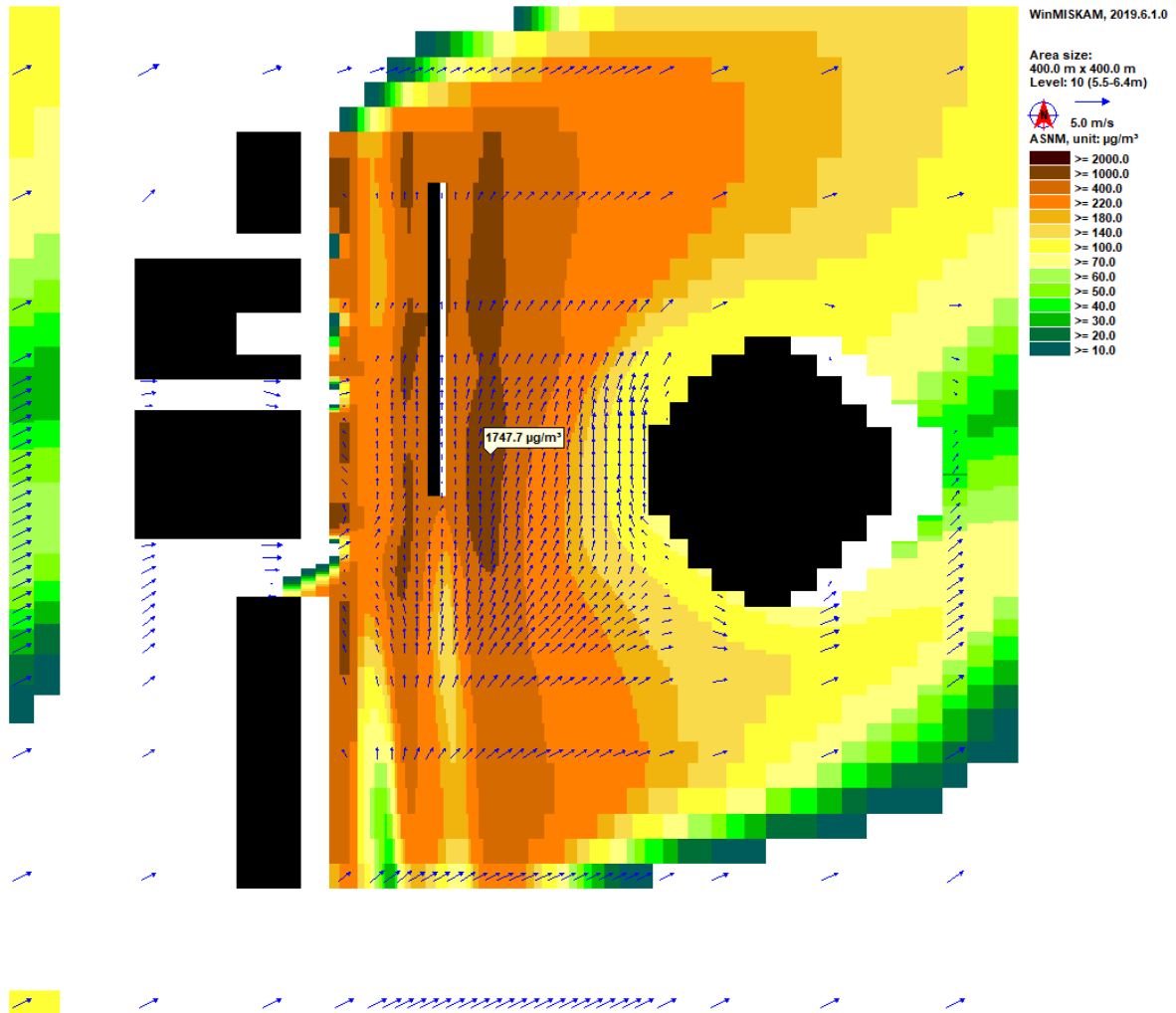
Fuente: Autor.

En la anterior figura se observa como para el NO<sub>x</sub> en la estación Calle 100 a las 9 h, se supera el límite máximo recomendado de concentración de 200 µg/m<sup>3</sup> para una hora en casi toda la vía. El mayor punto de concentración reporta un valor altísimo de 4.380,1 µg/m<sup>3</sup>, y está ubicado al lado de la estación de TM. Podría decirse que la velocidad del viento es intermedia al total de las tomadas en las diferentes horas y ubicaciones.

Figura 3.15: Estación Calle 100, NO<sub>x</sub> a las 20 h en escenario de línea base.

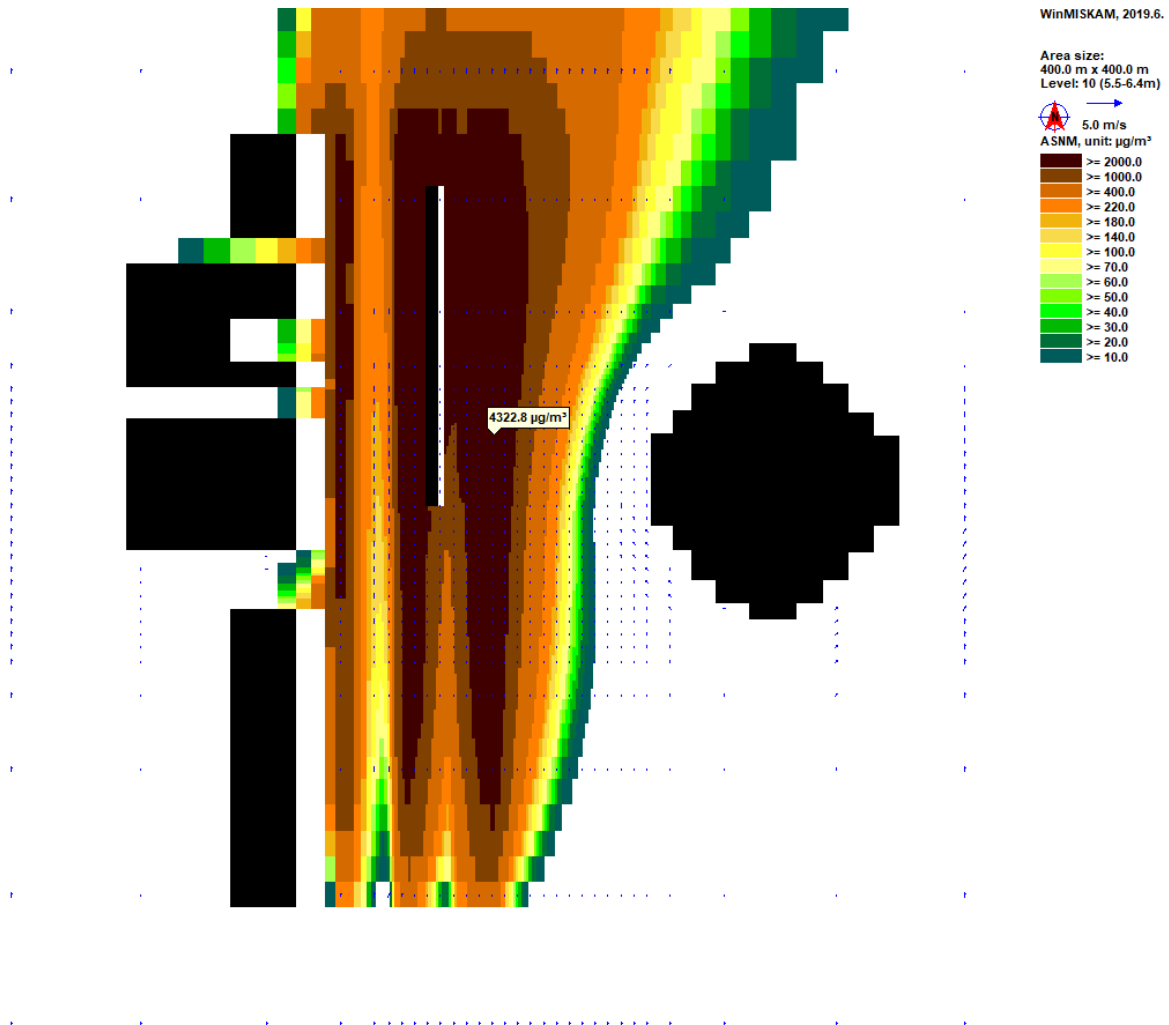
Fuente: Autor.

En la anterior figura para las 20 h, se observa que en casi toda la vía se supera el límite máximo recomendado de concentración de  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para una hora, estando los mayores valores en el sentido norte-sur de la vía y el máximo punto de concentración en ese lado junto a la estación de TM con un valor de  $2.744,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Además de ser una hora de menor tráfico vehicular, cuenta con una velocidad del viento un poco mayor que la de la hora anteriormente graficada.

Figura 3.16: Estación Coliseo, NO<sub>x</sub> a las 12 h en escenario de línea base.

Fuente: Autor.

En la anterior figura para las 12 h en la estación Coliseo, se ve una superación del límite recomendado concentración para una hora de 200  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en casi toda la vía; el valor máximo de concentración es de 1.747,7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y se encuentra en el costado sur-norte de la vía.

Figura 3.17: Estación Coliseo, NO<sub>x</sub> a las 21 h en escenario de línea base.

Fuente: Autor.

En la anterior figura, para las 21 h, se observa que en casi toda la vía se supera el límite máximo recomendado de concentración de  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para una hora, estando los mayores valores en el sentido sur-norte de la vía y el máximo punto de concentración en ese lado con un valor de  $4.322,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . A pesar de ser una hora de menor tráfico vehicular, cuenta con concentraciones mayores a las de la hora de mayor tráfico vehicular, pues cuenta con una velocidad del viento bastante menor que la de la hora anteriormente graficada.

Se debe tener en cuenta que estas simulaciones mostradas no incluyen la concentración de fondo en sus resultados por lo que los valores definitivos son mayores en los valores

mostrados previamente en la tabla 2.2. Hay una gran superación de los límites permitidos para los tres contaminantes en la calle, donde transitan los vehículos, con excepción de una hora valle, 20 h en la estación Calle 100 para  $PM_{2.5}$ . En varias partes del dominio se observa la superación del límite de concentración para un día de  $PM_{2.5}$  de  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . En casi todo el espacio del escenario línea base se aprecia que se supera el límite recomendado para 8 horas de exposición a CO,  $10.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , alcanzando en varias partes de la vía el de una hora de exposición,  $40.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

En casi todo el espacio del escenario línea base se aprecia que se supera el límite recomendado para 1 hora de exposición a  $NO_x$  de  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . El  $NO_x$  es el contaminante que cuenta con las mayores excedencias a las normativas recomendadas de exposición en el tiempo, con valores superiores a estas en un orden de magnitud inclusive. Además de la hora que representa al tráfico vehicular se evidencia que la velocidad del viento tiene una influencia determinante en la dispersión de los contaminantes y por tanto en las concentraciones finalmente obtenidas, de modo que a mayor velocidad del viento se obtiene una mayor dispersión de contaminantes y menor concentración final de los mismos.

Se aprecia que varios de los puntos de mayor concentración de contaminantes se encuentran alrededor de las estaciones de TM, lo anterior tiene que ver con que la estación de TM se encuentra en el centro de todas las calzadas entonces recibe la contaminación desde todos los lados y es un punto donde ésta se concentra. Hay una tendencia leve de mayores concentraciones en el sentido sur-norte de la vía en ambos sitios de simulación, en la parte superior derecha, debido a la dirección del viento marcada por los vectores azules.

### **3.3. Relación de las concentraciones a nivel de calle con la exposición**

A continuación se presentan las concentraciones simuladas en los puntos marcados con los círculos rojos anteriormente especificando las coordenadas de la celda (i eje x, j eje y) para cada modo de transporte en el escenario línea base. Se calculó además lo presentado en la siguiente tabla en porcentaje, el Error Emisión área WM. a partir de la diferencia entre

las emisiones totales calculadas en Excel y las dibujadas en WM, diferencias que resultan aceptables.

Tabla 3.1: Concentraciones simuladas en el escenario línea base en los puntos marcados con los círculos rojos anteriormente especificando las coordenadas de la celda (i eje x, j eje y) para cada modo de transporte. Fuente: Autor.

			Modo de transporte. Concentración simulada ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )												
			Estación	A pie (sendero Peatonal)			Bicicleta			Moto			TransMilenio		
			Calle 100:	i 20 j 3	i 22 j 72	i 20 j 133	i 24 j 3	i 24 j 72	i 24 j 133	i 28 j 3	i 28 j 72	i 28 j 133	i 64 j 3	i 62 j 72	i 62 j 133
Ho-ra	Contaminante	Error Emisión área WM.	Coliseo:	i 75 j 2	i 75 j 83	i 75 j 137	i 66 j 2	i 66 j 83	i 66 j 137	i 61 j 2	i 61 j 83	i 61 j 137	i 47 j 2	i 47 j 83	i 47 j 137
13	PM2.5	-0,1%	Calle 100	0,1	0,9	0,5	0,4	1,4	1,4	4,1	4,7	5,6	16,3	42,3	38,8
20	PM2.5	-1,4%	Calle 100	0,2	17,0	15,6	1,0	19,1	18,1	8,8	23,6	21,4	15,9	36,6	49,8
12	PM2.5	-1,5%	Coliseo	14,3	15,2	22,1	20,9	32,8	34,1	18,5	56,6	40,9	4,4	24,3	22
21	PM2.5	-0,7%	Coliseo	1,3	29,3	53,0	15,9	83,3	84,7	32,2	115,0	108,3	14,7	66,7	115,8
9	NOx	-7,2%	Calle 100	29,7	29,3	33,1	55,5	62,9	77,1	233,1	280,2	284,9	1218,6	2146,1	2211,9
20	NOx	-2,0%	Calle 100	9,7	950,6	849,5	58,3	1062,5	993,2	504,0	1306,8	1186,4	720,8	1299,8	1803,3
12	NOx	-1,0%	Coliseo	394,0	422,6	614,7	576,0	904,2	941,0	512,5	1552,5	1124,0	151,8	658,4	594,5
21	NOx	-0,9%	Coliseo	51,7	1070,4	1893,3	611,4	3067,8	3060,9	1233,3	4187,4	3908,9	335,9	1820,0	2852,1
9	CO	-2,1%	Calle 100	322,6	453,4	490,3	645,4	1008,2	1156,2	3019,6	4617,5	4166,6	19863,0	33852,0	29808,0
18	CO	-11,3%	Calle 100	162,3	9431,0	6451,8	844,4	10231,0	7693,7	6335,2	12117,0	9640,3	4749,1	7277,3	10614,0
21	CO	-0,9%	Coliseo	861,3	16551,0	27987,0	10181,0	47847,0	46154,0	20351,0	64199,0	58933,0	552,3	13064,0	12013,0

Luego se obtuvo el promedio para cada una de las tres lecturas y se le sumó la concentración de fondo.

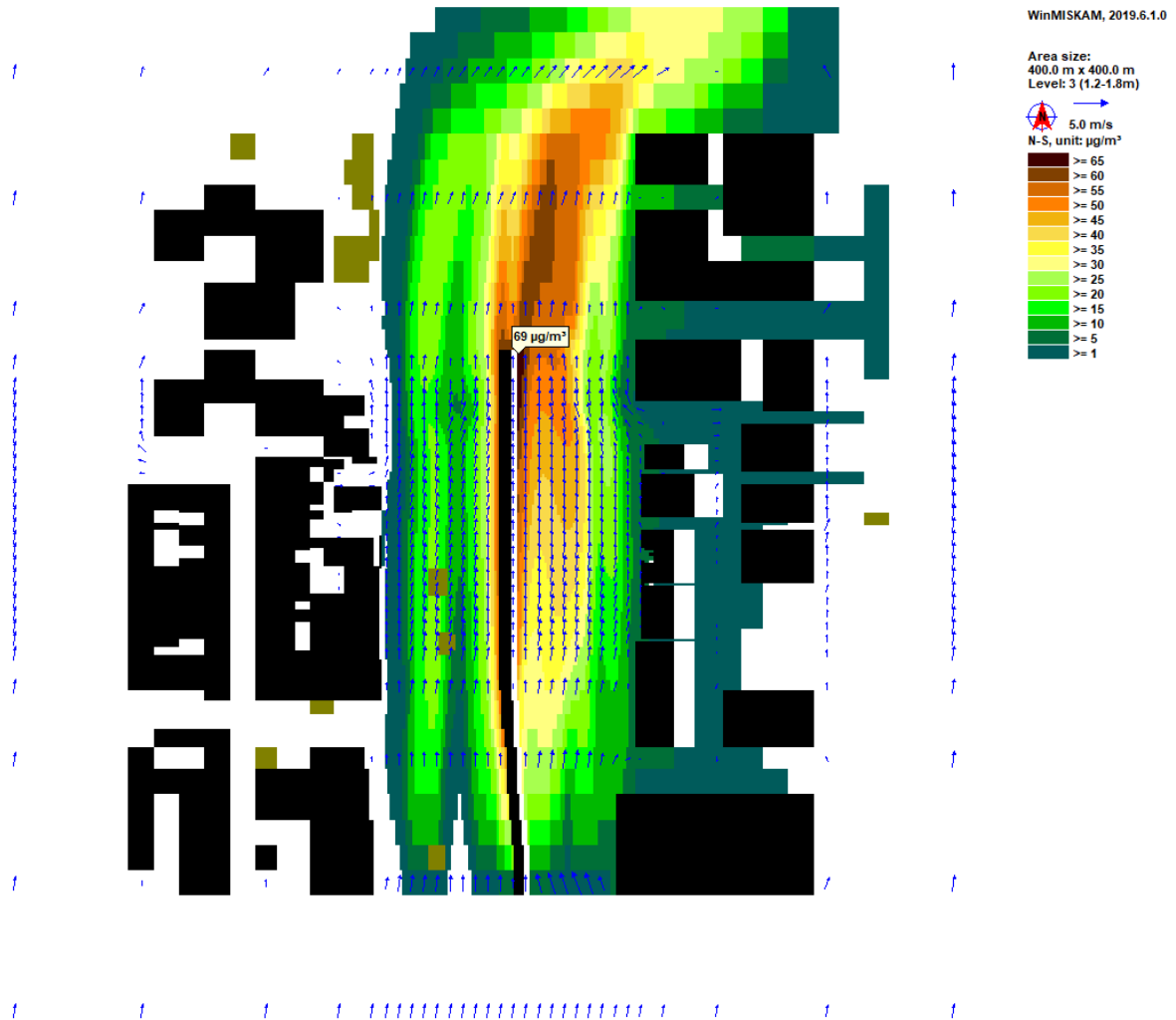
Tabla 3.2: Concentración simulada más la de fondo en el escenario línea base para cada modo de transporte. Fuente: Autor.

Hora	Contaminante	Estación	Concentración simulada más de fondo ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )			
			Moto	A pie	TM	Bicicleta
13	PM <sub>2.5</sub>	Calle 100	15,6	11,3	43,3	11,9
20	PM <sub>2.5</sub>	Calle 100	27,9	20,9	44,1	22,7
12	PM <sub>2.5</sub>	Coliseo	76,1	54,6	54,5	66,7
21	PM <sub>2.5</sub>	Coliseo	110,2	52,9	90,7	86,3
9	NO <sub>x</sub>	Calle 100	289,2	53,9	1.882,0	88,3
20	NO <sub>x</sub>	Calle 100	1.066,8	671,0	1.342,3	772,4
12	NO <sub>x</sub>	Coliseo	1.138,7	520,0	540,0	847,4
21	NO <sub>x</sub>	Coliseo	3.168,2	1.063,5	1.727,7	2.305,1
9	CO	Calle 100	4.186,5	674,0	28.092,9	1.188,5
18	CO	Calle 100	9.575,6	5.559,8	7.758,3	6.467,8
21	CO	Coliseo	48.660,4	15.965,8	9.375,8	35.560,0

Por otra parte al hacer la comparación entre los usuarios de diferentes modos de transporte para la línea base, para el  $PM_{2.5}$  se observa que las mayores concentraciones se encuentran en los puntos calculados para TM, seguidos de los calculados para las motos y luego las bicicletas y peatones en ese orden. Dicho orden también se observa para el CO en la ubicación Calle 100 a las 9 h y en la ubicación Calle 100 para los  $NO_x$ , mientras que para la ubicación Coliseo el orden es diferente con las mayores concentraciones en el punto simulado para las motos seguido por el de las bicicletas. Asimismo el mismo último orden se presenta para el CO en la ubicación Coliseo. Para la otra hora de CO en Calle 100, en esta ubicación el punto de moto tiene una mayor concentración que el punto de TM seguido el orden para bicicleta y peatones respectivamente.

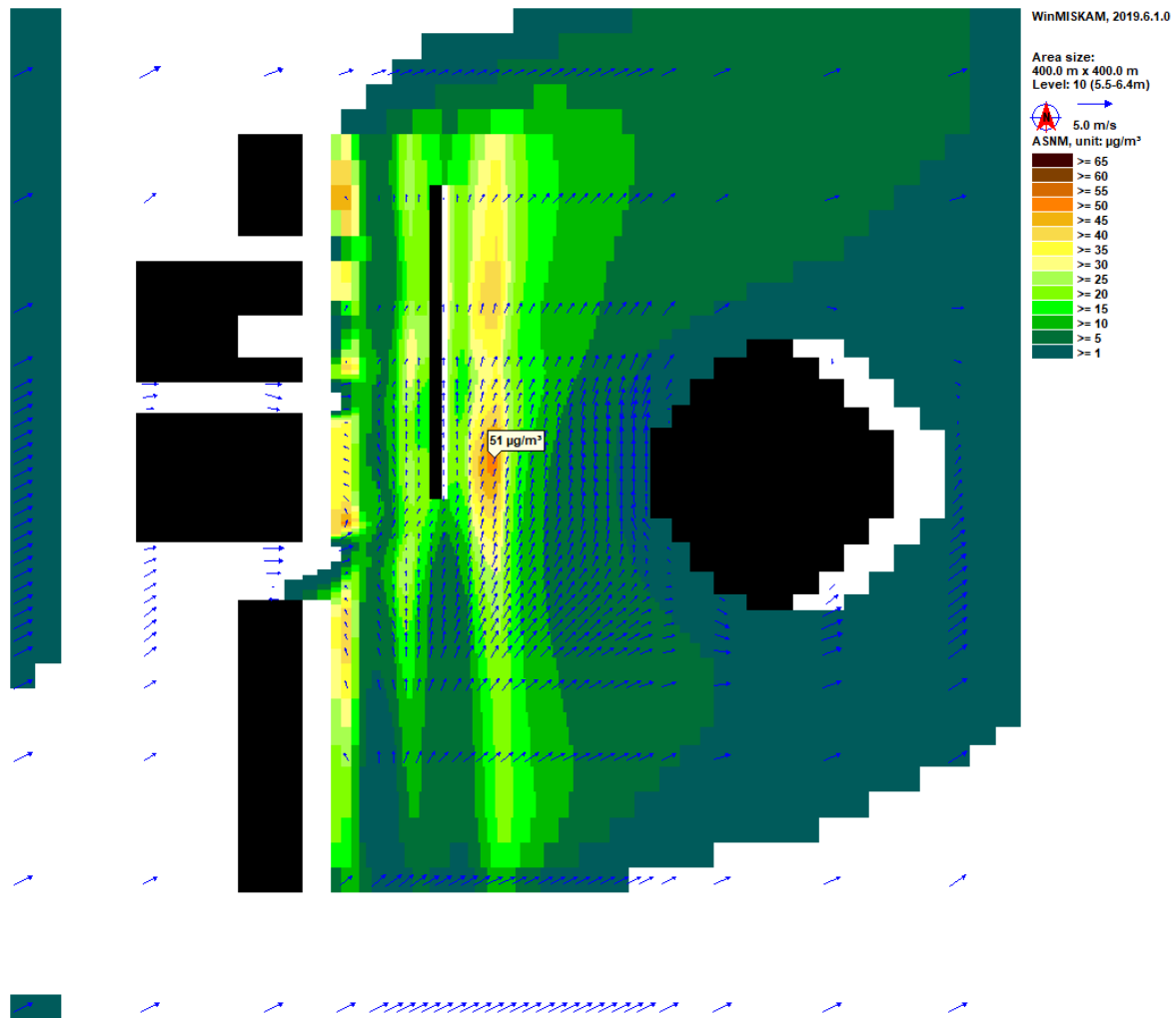
### **3.4. Evaluación de estrategias de disminución de la contaminación**

Cada estrategia muestra un pequeño logro de disminución, con excepción de la estrategia 2 y 3 para  $PM_{2.5}$  en la estación Calle 100 y Coliseo respectivamente donde no se ve disminución en la concentración máxima (en la segunda en otro tipo de gráfica como las del final de este numeral, incluso aparecen algunos aumentos, lo cual no tiene sentido y puede deberse al aumento del tamaño de celda por encima del 1x1, m perdiendo exactitud, alrededor de la zona peatonal norte-sur y en puntos centrales la disminución máxima que no se nota y es de apenas máximo 10%). A continuación se muestran las concentraciones tras la simulación de los escenarios de disminución para las simulaciones hechas para las horas de mayor emisión:

Figura 3.18: Estación Calle 100, PM<sub>2.5</sub> a las 13 h en el escenario 1.

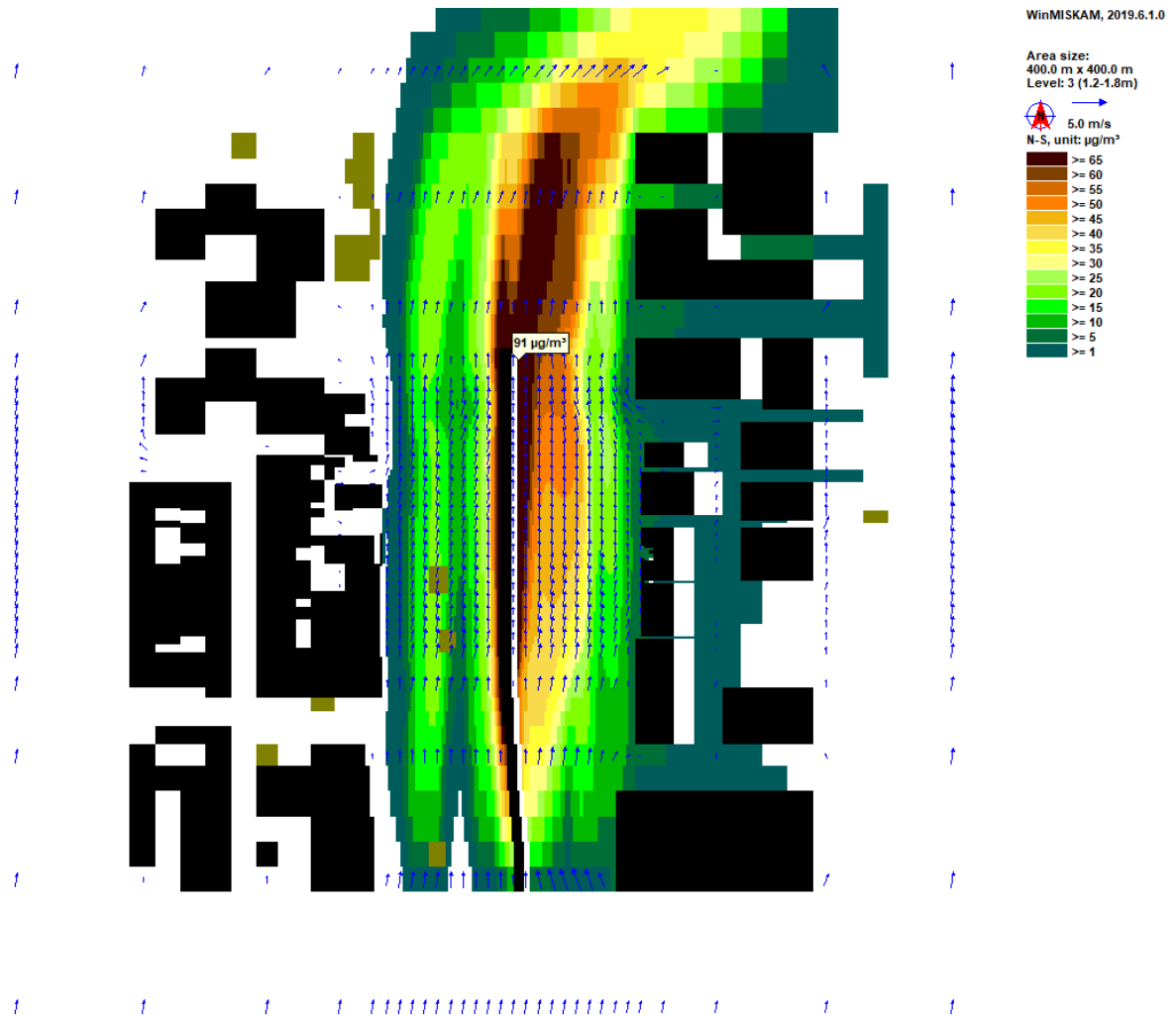
Fuente: Autor.

En la figura anterior de PM<sub>2.5</sub>, a las 13 h se observa que los valores de concentración en general se encuentran por debajo del valor recomendado de exposición diario, este se supera principalmente en la parte superior derecha de las vías, que corresponde al sentido sur-norte en la calzada exclusiva de TM y la rápida mixta. Donde se tienen valores que sobrepasan los 50 µg/m<sup>3</sup> para 24 h de exposición que recomienda la norma. Se tiene un valor máximo de 69 µg/m<sup>3</sup> al lado de la estación de TM.

Figura 3.19: Estación Coliseo, PM<sub>2.5</sub> a las 12 h en el escenario 1.

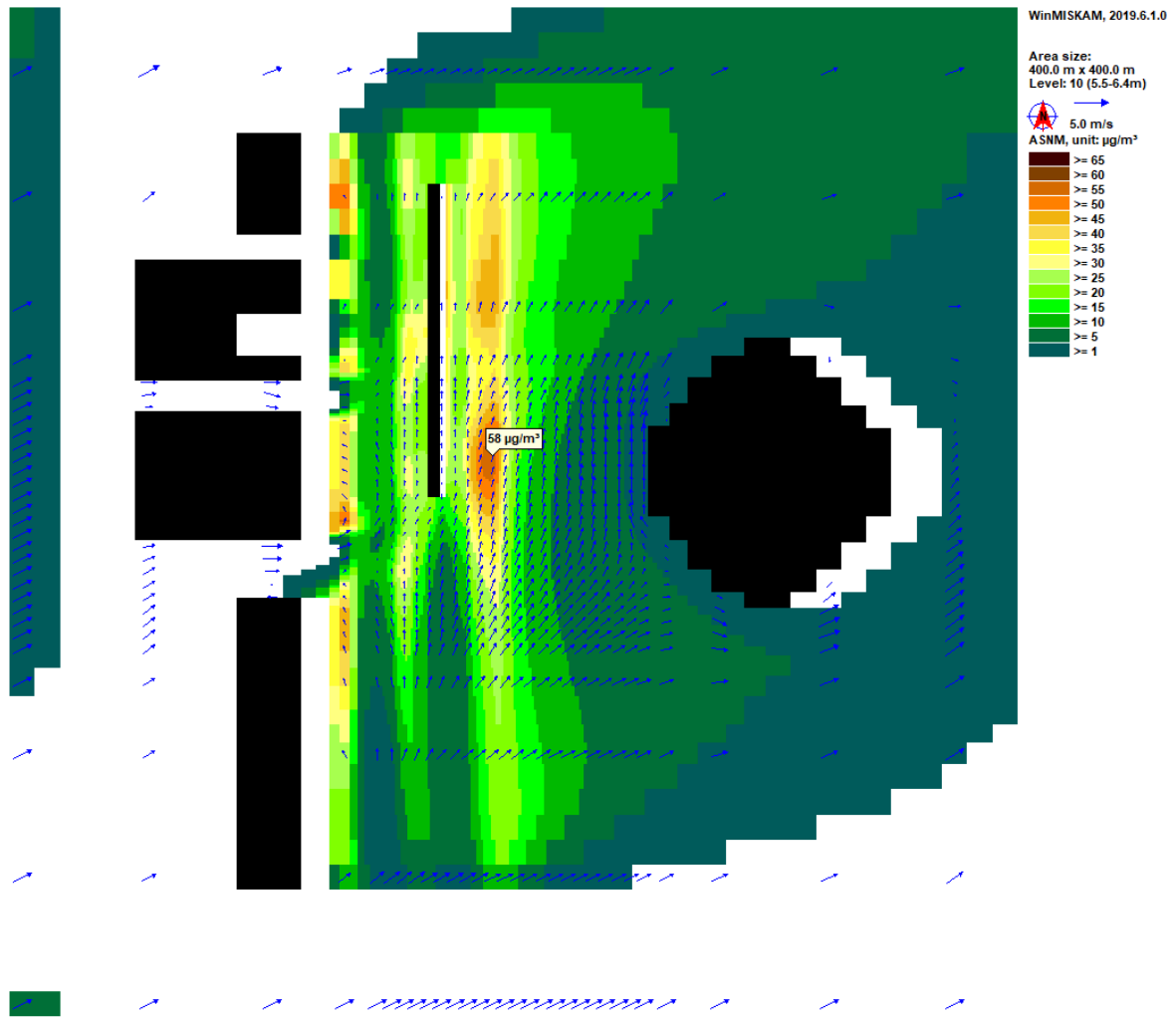
Fuente: Autor.

Para la estación Coliseo se aprecian a las 12 h, valores en la calzada sur-norte por debajo de lo recomendado para la exposición en un día y también aunque no tan bajos, cerca del andén de la calzada norte-sur. El pico máximo de concentración es en la calzada mixta sur-norte, de 51  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . El andén de la calzada sur-norte al ser un espacio abierto, refleja concentraciones más bajas.

Figura 3.20: Estación Calle 100, PM<sub>2.5</sub> a las 13 h en el escenario 2.

Fuente: Autor.

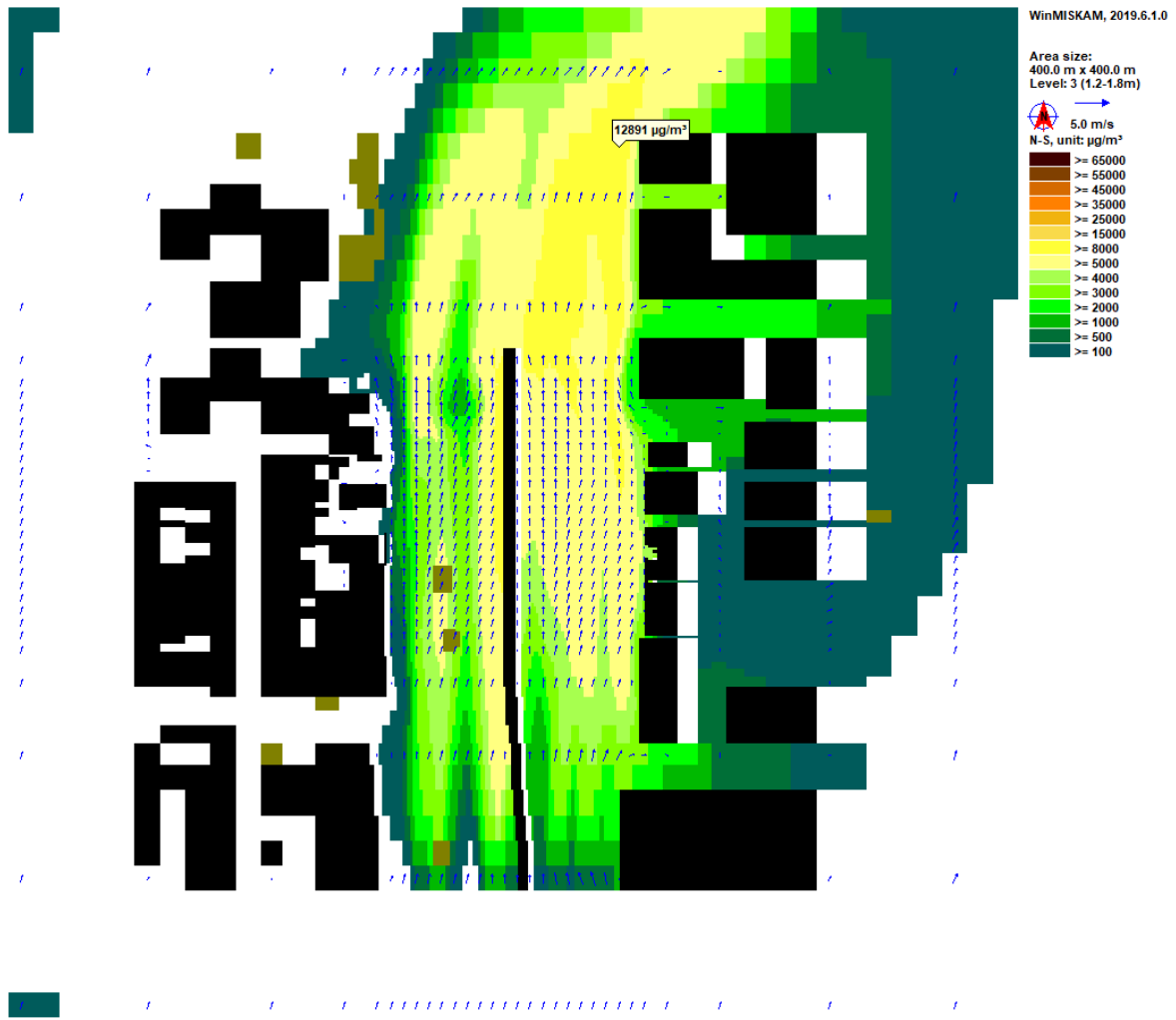
En la figura anterior de PM<sub>2.5</sub>, a las 13 h se observa un sobrepaso del valor recomendado de exposición en 24 h, principalmente en la parte superior derecha de las vías, que corresponde al sentido sur-norte en la calzada exclusiva de TM y la rápida mixta, donde se tienen valores que sobrepasan los 50 µg/m<sup>3</sup> para un día de exposición que recomienda la norma. Se tiene un valor máximo de 91 µg/m<sup>3</sup> al lado de la estación de TM.

Figura 3.21: Estación Coliseo, PM<sub>2.5</sub> a las 12 h en el escenario 2.

Fuente: Autor.

Para la estación Coliseo se aprecian a las 12 h valores en la calzada sur-norte por debajo de lo recomendado para la exposición en un día y también, siendo más altos, cerca del andén de la calzada norte-sur. El pico máximo de concentración es en la calzada mixta sur-norte, de 58  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . El andén de la calzada sur-norte al ser un espacio abierto, refleja concentraciones bajas.

Figura 3.22: Estación Calle 100, CO a las 9 h en el escenario 2.



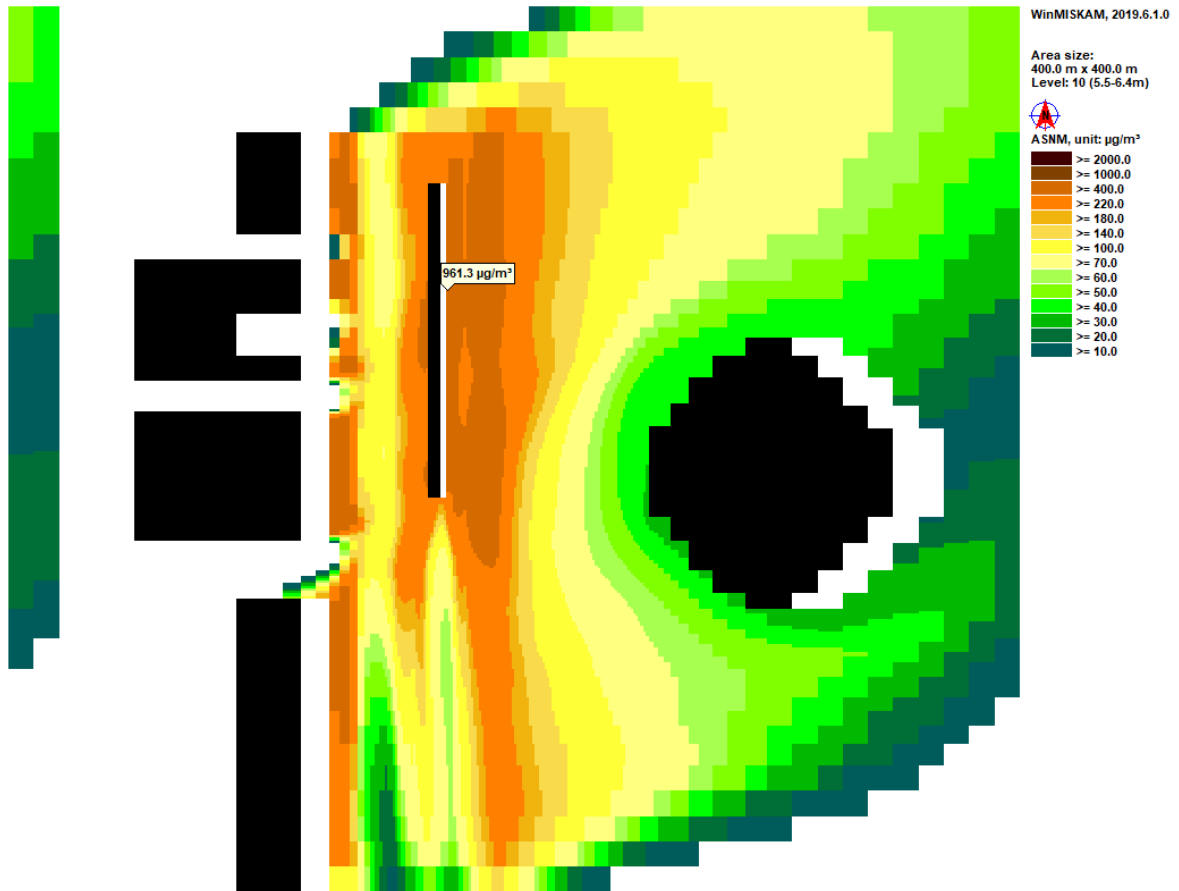
Fuente: Autor.

Para la estación Calle 100 se aprecian a las 9 h valores en las calzadas norte-sur y sur-norte muy por debajo de lo recomendado para la exposición en un día y más aún cerca del andén de la calzada norte-sur. El pico máximo de concentración es en la calzada mixta sur-norte, es de  $12.891 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Figura 3.23: Estación Calle 100, NO<sub>x</sub> a las 9 h en el escenario 2.

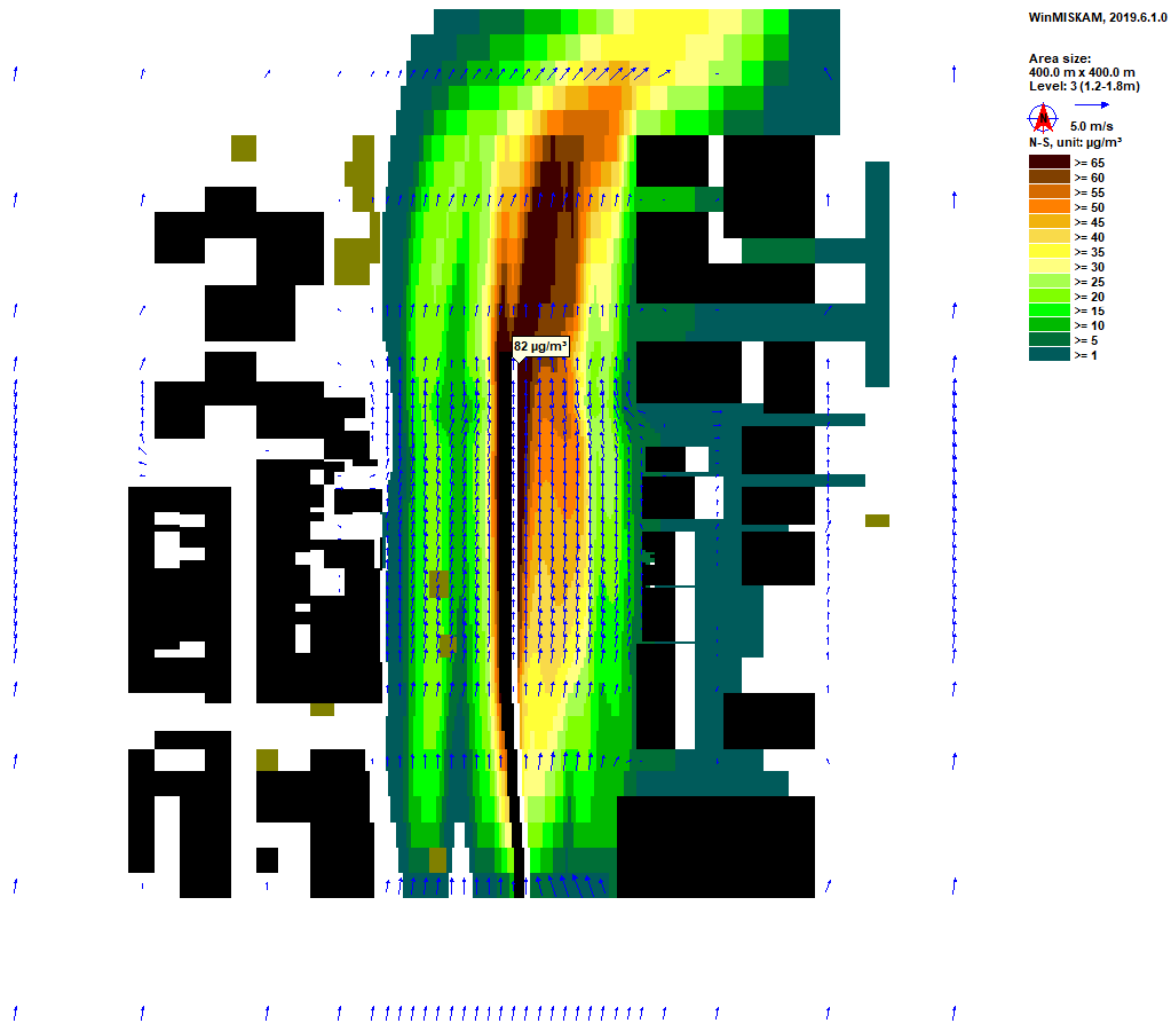
Fuente: Autor.

En la anterior figura para las 9 h en la estación Calle 100, se ve una superación del límite recomendado exposición para una hora de  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , en gran parte de la vía con un punto del valor máximo de concentración que es de  $3.429,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y se encuentra cerca a la estación de TM.

Figura 3.24: Estación Coliseo, NO<sub>x</sub> a las 12 h en el escenario 2.

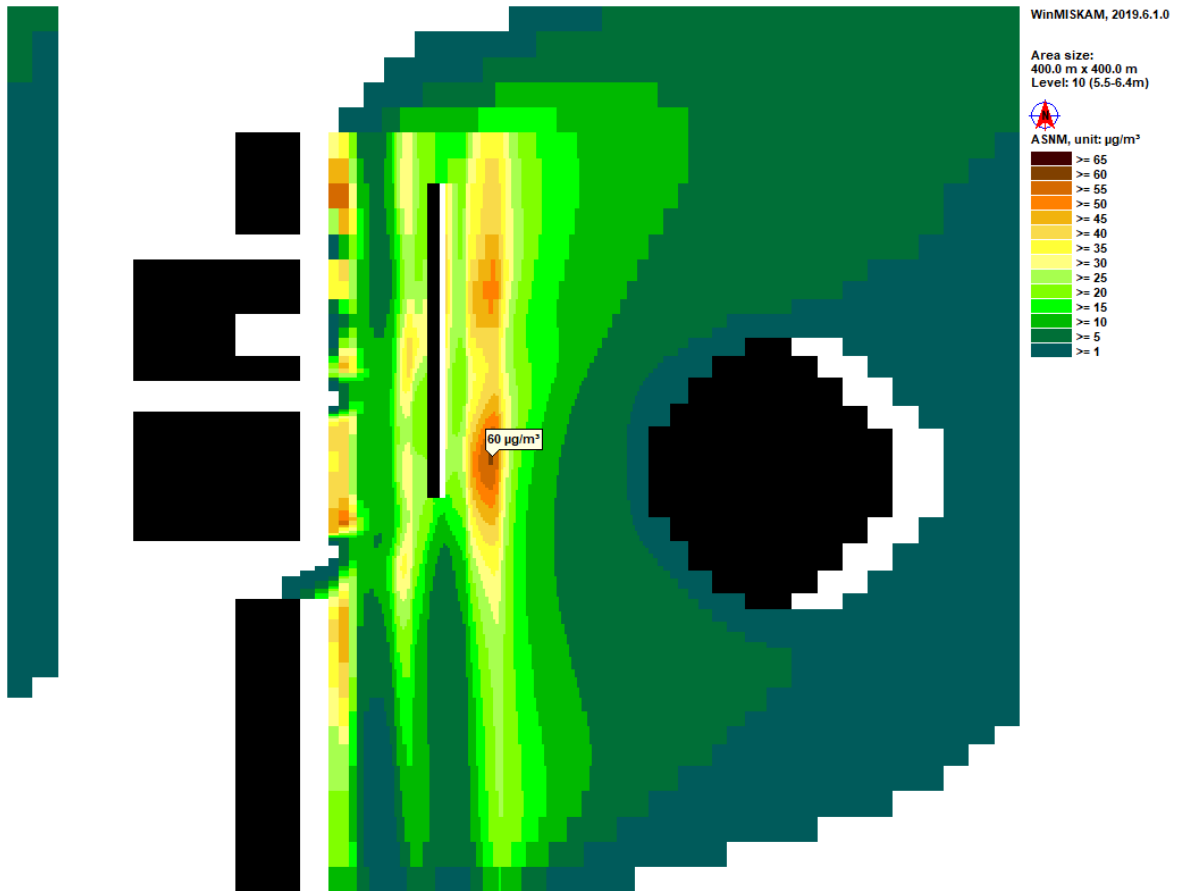
Fuente: Autor.

En la anterior figura para las 12 h en la estación Coliseo, se ve una superación del límite recomendado exposición para una hora de  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en buena parte de la vía con un punto del valor máximo de concentración que es de  $961,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y se encuentra cerca a la estación de TM.

Figura 3.25: Estación Calle 100,  $PM_{2.5}$  a las 13 h en el escenario 3.

Fuente: Autor.

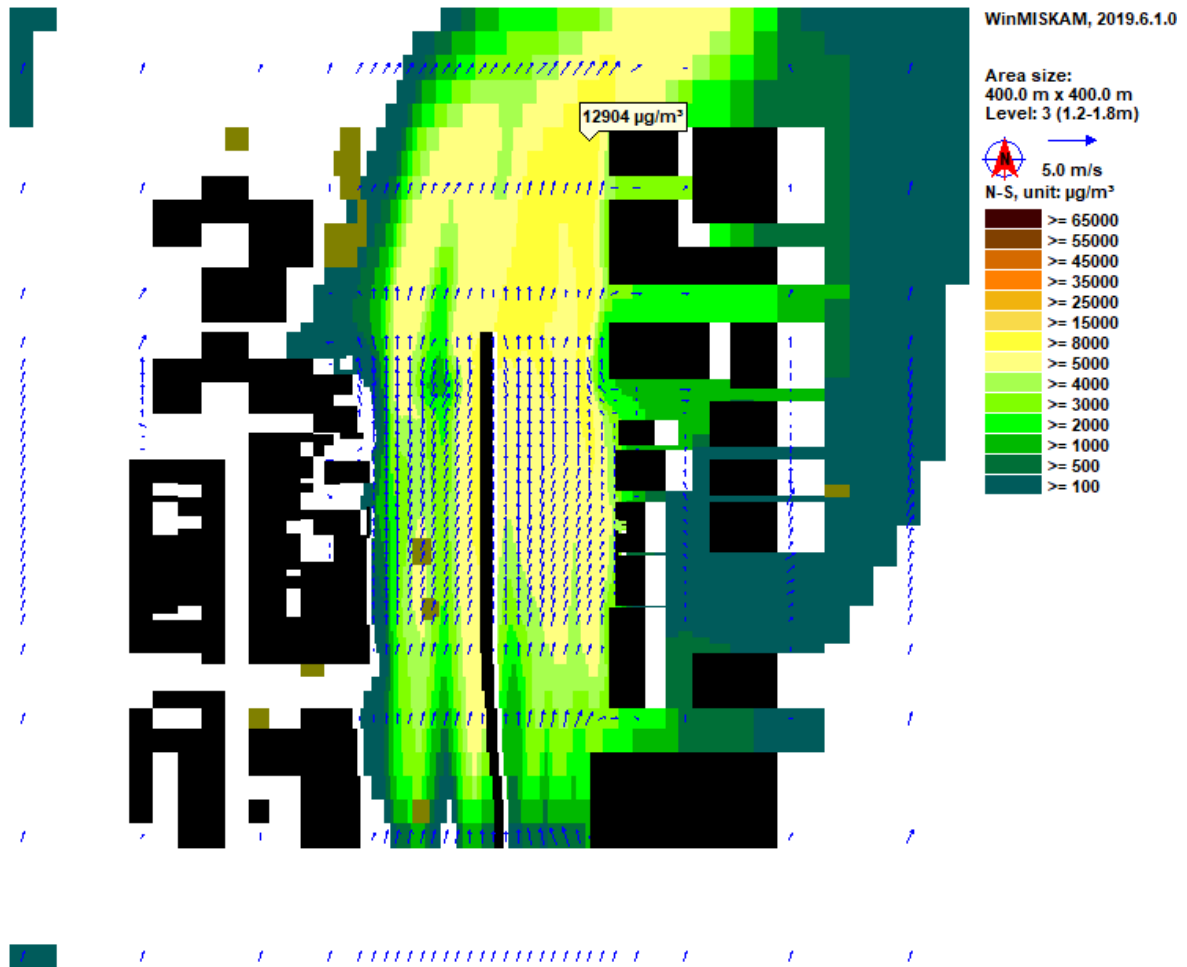
En la figura anterior de  $PM_{2.5}$ , a las 13 h se observa un sobrepaso del valor recomendado de exposición en 24 h, principalmente en la parte superior derecha de las vías, que corresponde al sentido sur-norte en la calzada exclusiva de TM y la rápida mixta. Donde se tienen valores que sobrepasan los  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para un día de exposición que recomienda la norma. Se tiene un valor máximo de  $82 \mu\text{g}/\text{m}^3$  al lado de la estación de TM.

Figura 3.26: Estación Coliseo, PM<sub>2.5</sub> a las 12 h en el escenario 3.

Fuente: Autor.

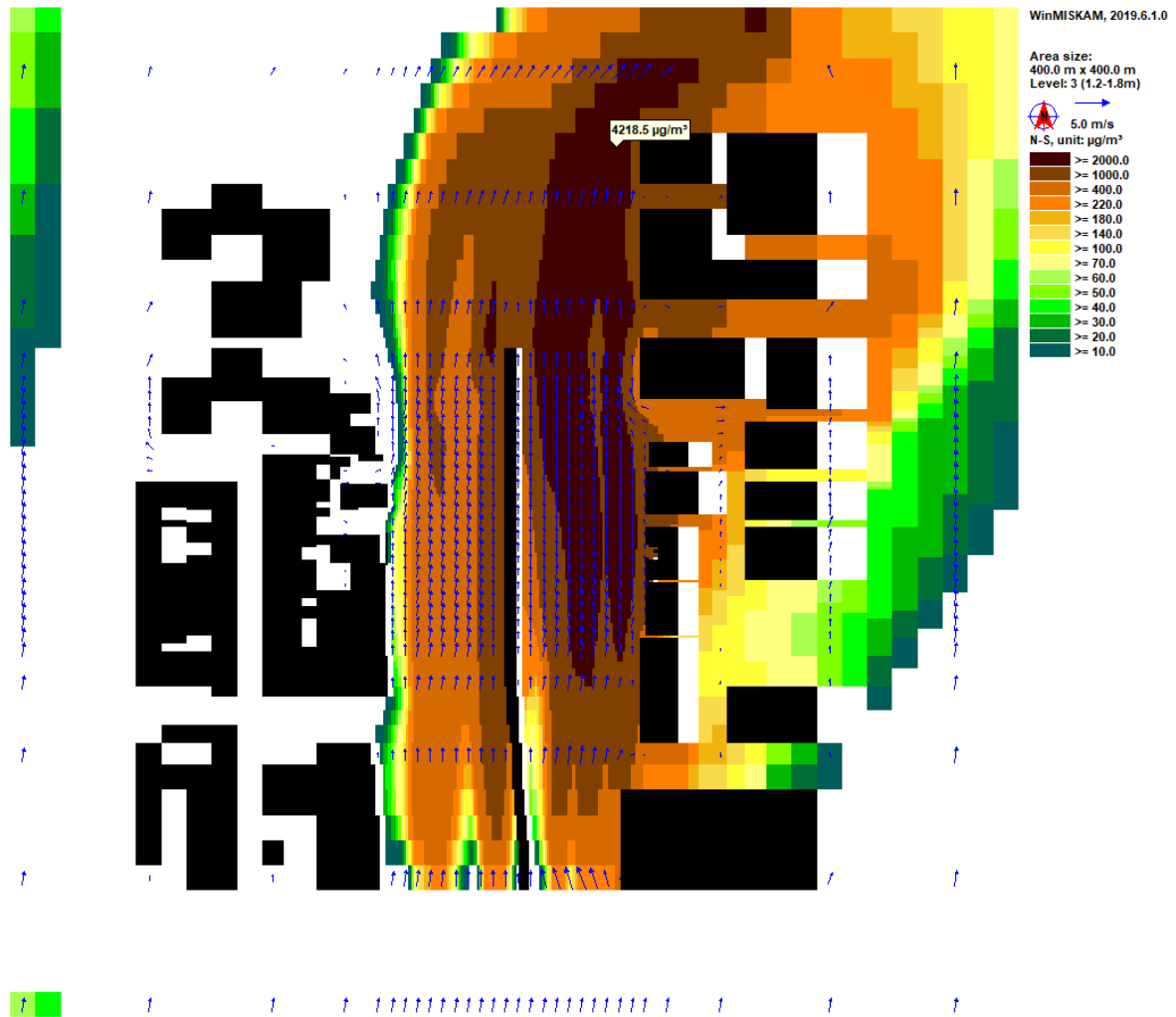
Para la estación Coliseo se aprecian a las 12 h valores en la calzada sur-norte por debajo de lo recomendado para la exposición en un día y también cerca del andén de la calzada norte-sur, siendo algo más altos. El pico máximo de concentración es en la calzada mixta sur-norte, de 60 µg/m³. El andén de la calzada sur-norte al ser un espacio abierto, refleja concentraciones bajas.

Figura 3.27: Estación Calle 100, CO a las 9 h en el escenario 3.



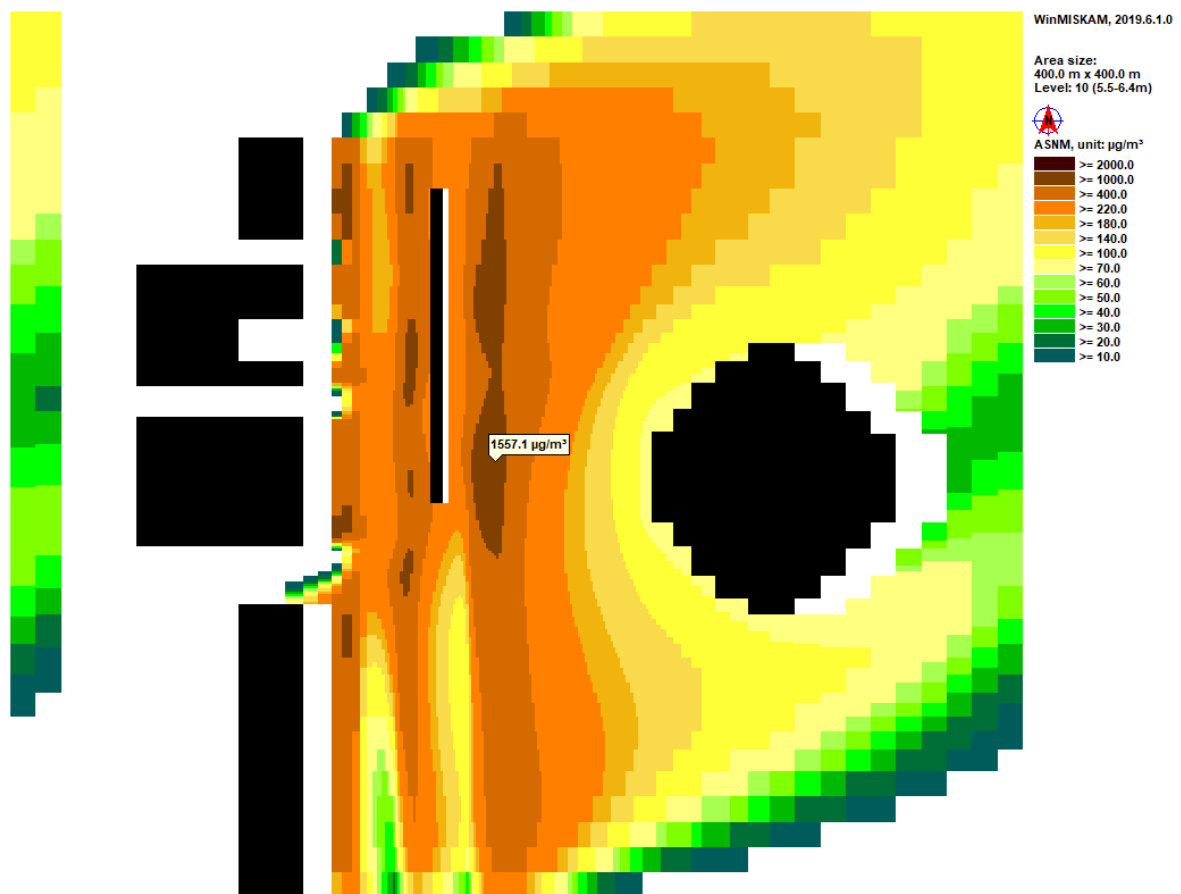
Fuente: Autor.

Para la estación Calle 100 se aprecian a las 9 h valores en las calzadas norte-sur y sur-norte muy por debajo de lo recomendado para la exposición en un día y más aún cerca del andén de la calzada norte-sur. El pico máximo de concentración es en la calzada mixta sur-norte, de 12.904 µg/m<sup>3</sup>.

Figura 3.28: Estación Calle 100, NO<sub>x</sub> a las 9 h en el escenario 3.

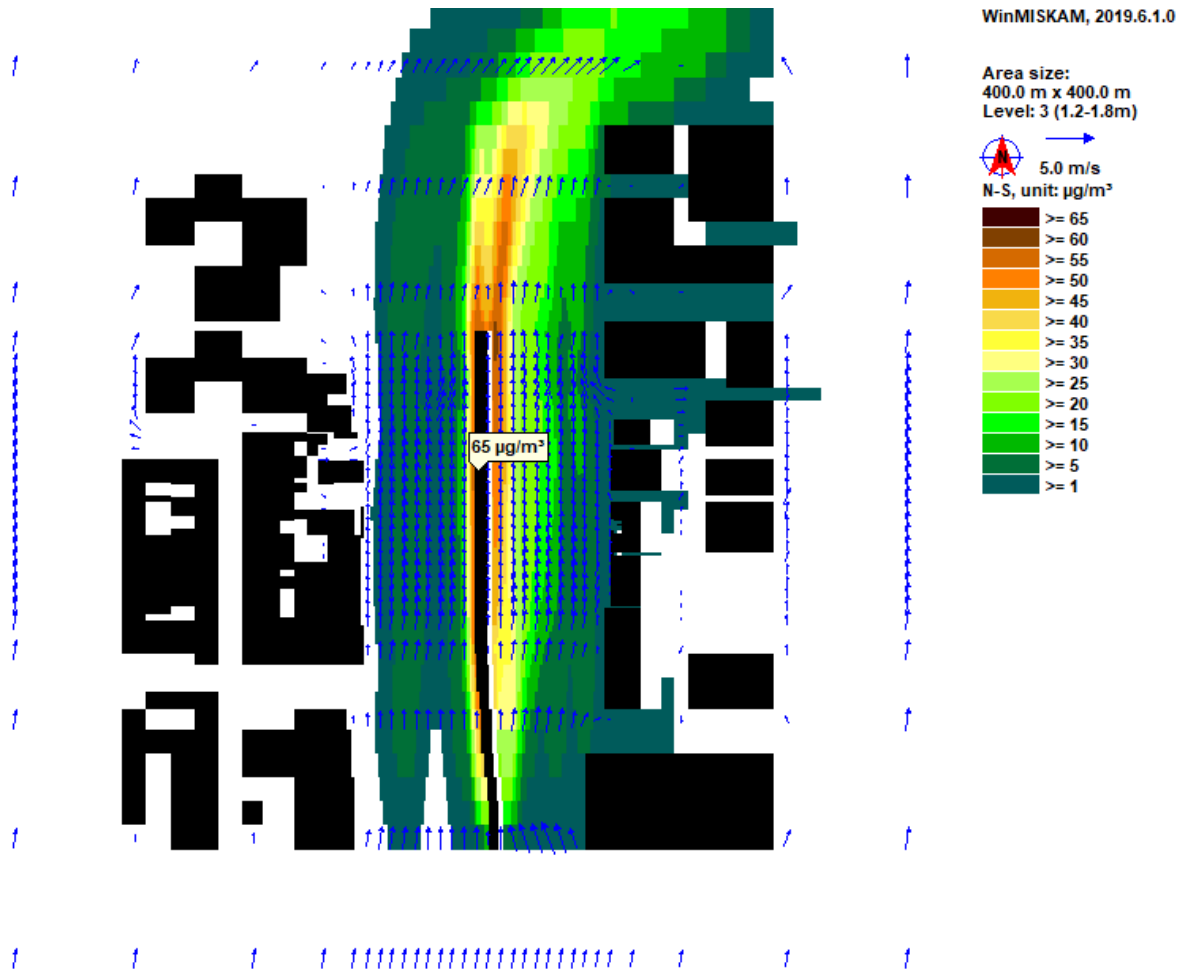
Fuente: Autor.

En la anterior figura para las 9 h en la estación Calle 100, se ve una superación del límite recomendado exposición para una hora de  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en gran parte de la vía con un punto del valor máximo de concentración que es de  $4.218,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y se encuentra en la calzada mixta sur-norte.

Figura 3.29: Estación Coliseo, NO<sub>x</sub> a las 12 h en el escenario 3.

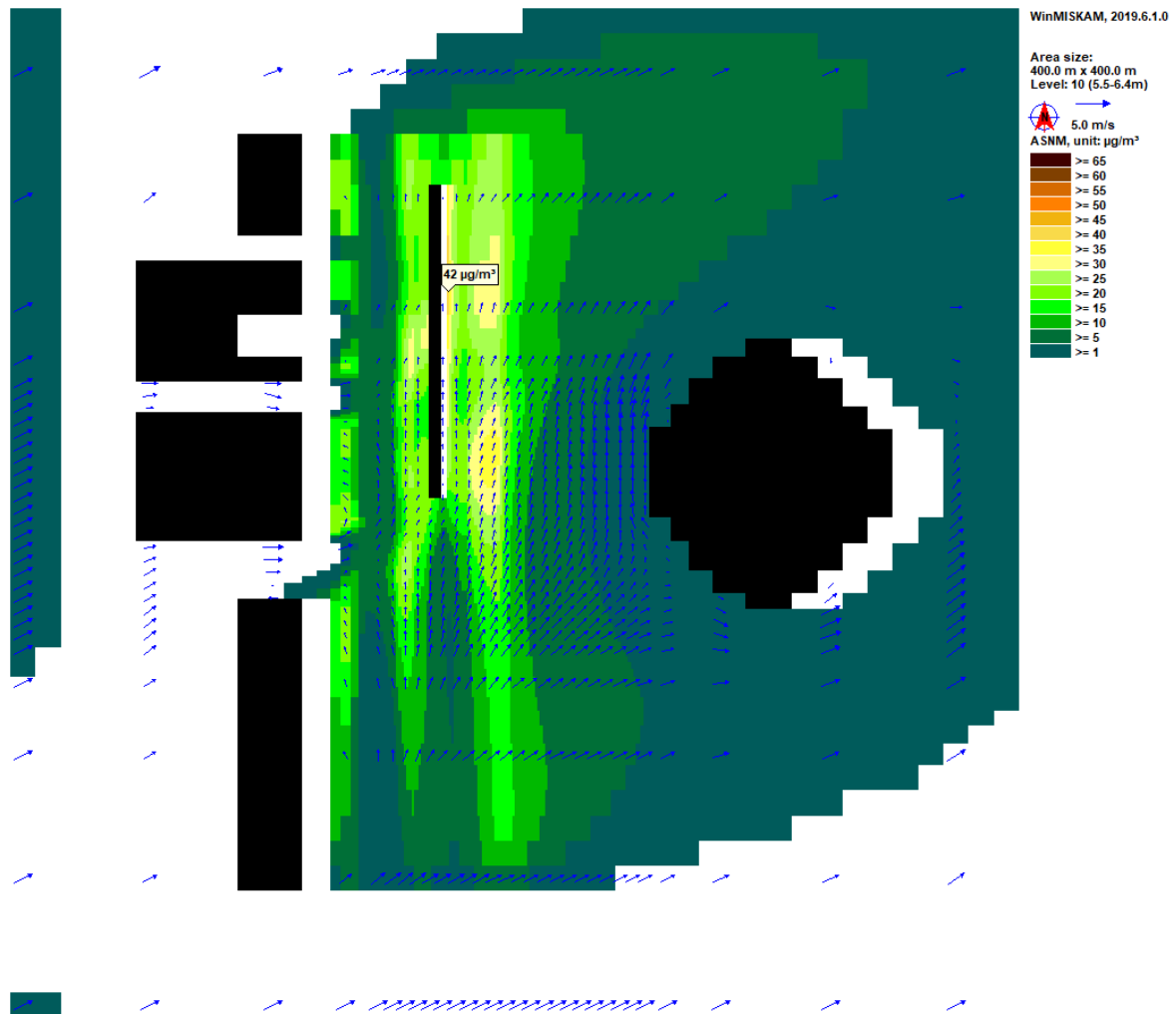
Fuente: Autor.

En la anterior figura para las 12 h en la estación Coliseo, se ve una superación del límite recomendado exposición para una hora de  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en buena parte de la vía con un punto del valor máximo de concentración que es de  $1.557,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y se encuentra en la calzada mixta sur-norte.

Figura 3.30: Estación Calle 100, PM<sub>2.5</sub> a las 13 h en el escenario 4.

Fuente: Autor.

En la figura anterior de PM<sub>2.5</sub>, a las 13 h se observa un sobrepaso del valor recomendado de exposición en 24 h, principalmente en la parte superior derecha de las vías, que corresponde al sentido sur-norte en la calzada exclusiva de TM y la rápida mixta, donde se tienen valores que sobrepasan los 50 µg/m<sup>3</sup> para un día de exposición que recomienda la norma. Se tiene un valor máximo de 65 µg/m<sup>3</sup> al lado de la estación de TM.

Figura 3.31: Estación Coliseo, PM<sub>2.5</sub> a las 12 h en el escenario 4.

Fuente: Autor.

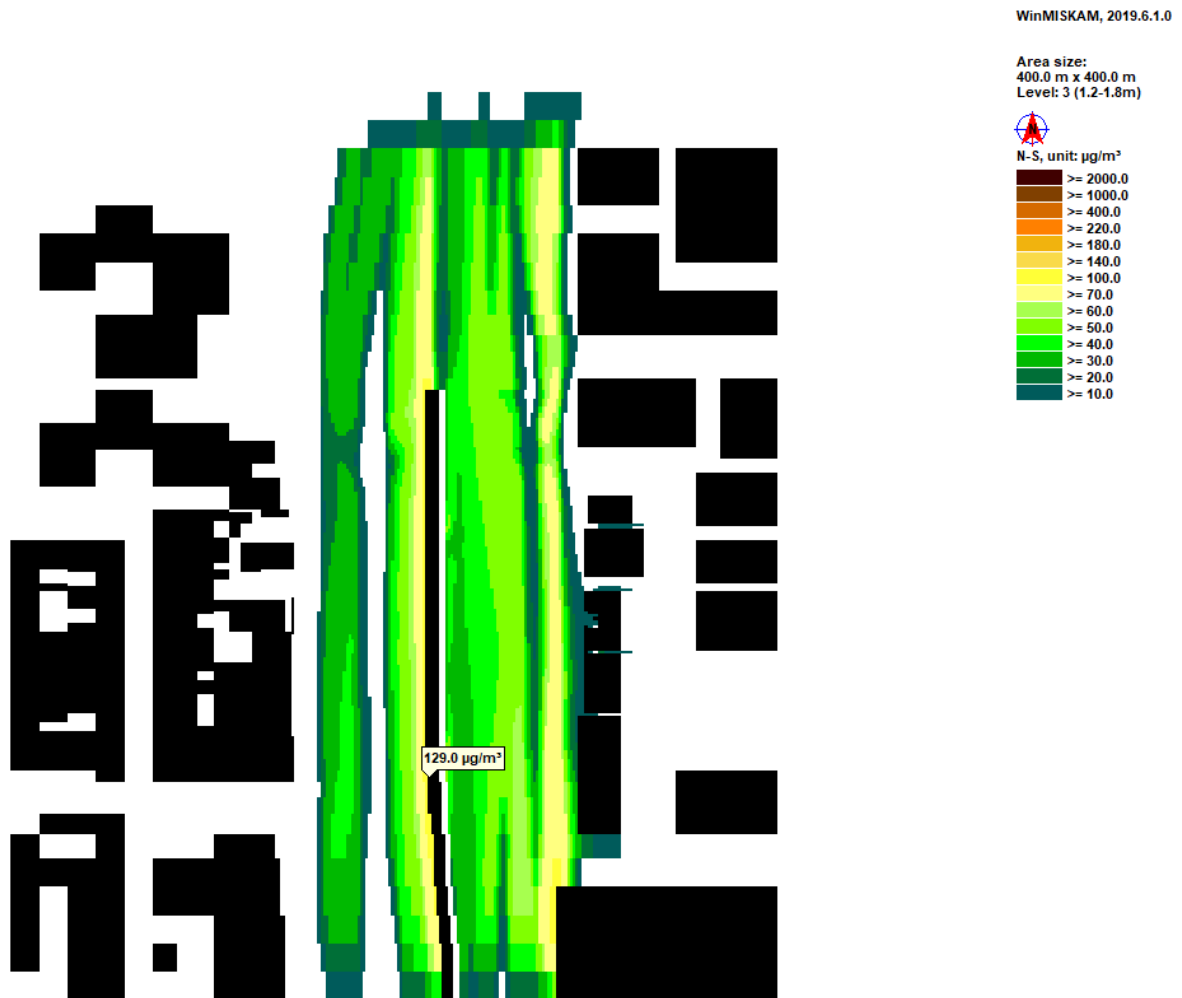
Para la estación Coliseo se aprecian a las 12 h valores en toda la vía por debajo de lo recomendado para la exposición en un día. El pico máximo de concentración es en la calzada mixta sur-norte, de 42  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . El andén de la calzada sur-norte al ser un espacio abierto, refleja concentraciones bajas.

Figura 3.32: Estación Calle 100, CO a las 9 h en el escenario 4.



Fuente: Autor.

Para la estación Calle 100 se aprecian a las 9 h valores en las calzadas norte-sur y sur-norte en general por debajo de lo recomendado para la exposición en una hora y más aún cerca del andén de la calzada norte-sur. El pico máximo de concentración es en la calzada mixta sur-norte, de 47.238 µg/m<sup>3</sup>.

Figura 3.33: Estación Calle 100, NO<sub>x</sub> a las 9 h en el escenario 4

Fuente: Autor.

En la anterior figura para las 9 h en la estación Calle 100, se ve una concentración por debajo del límite recomendado exposición para una hora de  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en toda la vía con un punto del valor máximo de concentración que es de  $129 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y se encuentra en la calzada de TM norte-sur.

Figura 3.34: Estación Coliseo, NO<sub>x</sub> a las 12 h en el escenario 4

Fuente: Autor.

En la anterior figura para las 12 h en la estación Coliseo, se ve una superación del límite recomendado exposición para una hora de  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en buena parte de la vía con un punto del valor máximo de concentración que es de  $1.270 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y se encuentra en la calzada mixta sur-norte.

Por su parte en los escenarios de estrategias de disminución se observa lo siguiente a nivel general. Para  $\text{PM}_{2.5}$  a pesar de las disminuciones producto de las estrategias de disminución aún hay lugares de la vía, principalmente en el sentido sur-norte en ambos lugares de simulación, donde se tienen valores que sobrepasan los  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para 24 h de

exposición que recomienda la norma. Por otro lado se observa que con las grandes disminuciones producto de las estrategias de disminución se mantiene en la mayor parte de la vía la concentración por debajo del límite de  $40.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para una hora para CO. Allí mismo para el  $\text{NO}_x$  se ven grandísimas excedencias en el límite permitido de  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para una hora, en gran parte de la vía excepto para un escenario y estación; se debe tener en cuenta que aunque sea la mayoría el  $\text{NO}_2$  no constituye todos los  $\text{NO}_x$  y por eso es posible que en realidad haya menos excedencias a la norma. Es así como a pesar de las grandes disminuciones con las de estrategias de disminución que se observan aún no se lograría cumplir por completo la normativa planteada para el año 2030.

A continuación se muestran disminuciones en porcentaje en el dominio producto de estas estrategias de disminución simuladas, graficadas en Excel de otro archivo de WM generado, para una altura de 1,5 m en la Calle 100 y de 5,99 m es decir 1,19 m sobre el suelo en Coliseo. Se debe tener en cuenta que las formas de los edificios (en negro) y espacios se ven distorsionadas de la realidad debido a que no están en escala. El área en negro de los edificios se ve aumentada por espacios con concentración igual a cero:

Figura 3.35: Estación Coliseo,  $PM_{2.5}$  a las 12 h. Porcentaje de disminución: escenario 1.

Fuente: Autor.

El porcentaje de disminución en general está alrededor de un 15% en la anterior figura para  $PM_{2.5}$  a las 12 h en la estación Coliseo. En un par de puntos en el medio de los edificios del costado norte-sur se observa que se alcanza un 100%. En este caso puede deberse a una sobrestimación por la pérdida de exactitud con la elongación de las celdas; de acuerdo a las emisiones, la mayor disminución en las calzadas de TM de más del 20% es previsible pues la resuspensión en estas es más grande.

Figura 3.36: Estación Coliseo, NO<sub>x</sub> a las 12 h. Porcentaje de disminución: escenario 2.

Fuente: Autor.

Para el  $\text{NO}_x$  en la estación Coliseo, a las 12 h prevalece una disminución del 60% en el sentido sur-norte en la calzada mixta y zona peatonal y se alcanza hasta un 80% en el otro sentido. Este es el efecto de los vehículos eléctricos en lugar de la gasolina, que requiere esfuerzos pero que vale la pena y por lo tanto que se debe alcanzar lo más pronto posible. Baja hasta alrededor del 30% en la calzada de TM en donde la emisión es la misma.

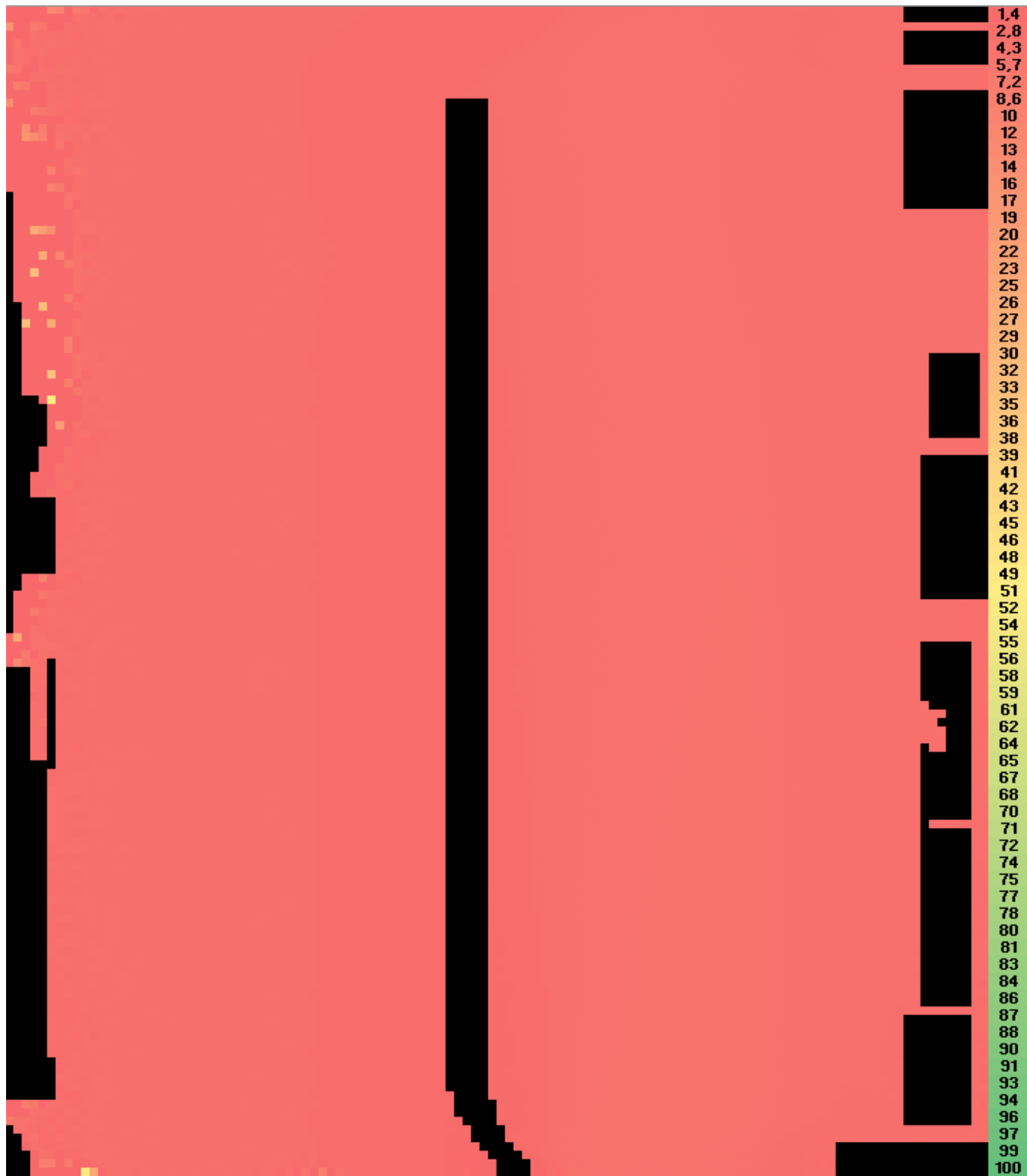
Figura 3.37: Estación Calle 100,  $\text{NO}_x$  a las 9 h. Porcentaje de disminución: escenario 3.



Fuente: Autor.

Para los NO<sub>x</sub> en la estación Calle 100 también se observa el efecto de las emisiones en la calzada de TM, pues al ser una estrategia que precisamente disminuye las emisiones de los buses que transitan en ella, se observa claramente como las mayores disminuciones entre un 10% y una disminución muy cercana al 100% se dan en ella. El resto del dominio se tienen disminuciones más cercanas al 0% pues está lejos de la influencia de la calzada de TM y no se presentan disminuciones representativas incluso fracción negativa.

Figura 3.38: Estación Calle 100, CO a las 9 h. Porcentaje de disminución: escenario 4.



Fuente: Autor.

Para el CO con la estrategia de disminución de camiones eléctricos, se observa en todo el dominio un porcentaje de disminución alrededor de un 2%, debido a que esta categoría vehicular no tiene gran aporte de emisiones de este contaminante. En un par de puntos cercanos los edificios del costado norte-sur se observa que se alcanza un 50%. En este

caso puede deberse a una sobrestimación por la pérdida de exactitud con la elongación de las celdas.

En las figuras anteriores se observa en general una pobre disminución de las concentraciones para los contaminantes siendo un poco menor para el  $PM_{2.5}$  debido al efecto de la resuspensión, que no baja tanto en el escenario 1 de disminución, en la estación Coliseo se tiene una disminución de alrededor del 15%. La mayor disminución en las calzadas de TM de más del 20% es previsible pues la resuspensión en estas es más grande. Se debe considerar el efecto de retroalimentación positiva en el caso de la carga de sedimentos finos  $sL$ , en el cálculo de la resuspensión debido a que al ser menor la emisión directa de  $PM_{2.5}$  y este factor  $sL$ , por tanto la resuspensión bajará también de modo que se hace importante poder calcular, cuánto bajaría dicha carga de sedimentos finos con vehículos eléctricos en la mayoría de las categorías vehiculares.

Para los  $NO_x$  en la estación Coliseo, prevalece una disminución del 60% en el sentido sur-norte en la calzada mixta y zona peatonal y se alcanza hasta un 80% en el otro sentido. Al ser un escenario de disminución de la categoría vehicular livianos más los taxis, se ve que la disminución está repartida en todo el dominio y no sólo sobre una calzada en especial debido a que los livianos pueden transitar en varias calzadas en ambos sentidos de la vía. Para los  $NO_x$  en la estación Calle 100 también se observa el efecto de las emisiones en la calzada de TM, pues al ser una estrategia que precisamente elimina las emisiones de los buses que transitan en ella, se observa claramente como las mayores disminuciones entre un 10% y una disminución muy cercana al 100% se dan en ella. El resto del dominio se tienen disminuciones más cercanas al 0%.

Para el CO con la estrategia de disminución de camiones eléctricos, se observa en todo el dominio un porcentaje de disminución alrededor de un 2%, debido a que esta categoría vehicular no tiene gran aporte de emisiones de este contaminante.

A continuación se muestran concentraciones simuladas en estos escenarios de estrategias de disminución promediados los puntos marcados con los círculos rojos anteriormente y sumando la concentración de fondo:

Tabla 3.3: Concentración simulada más de fondo en escenarios de estrategias de disminución por modo de transporte Fuente: Autor.

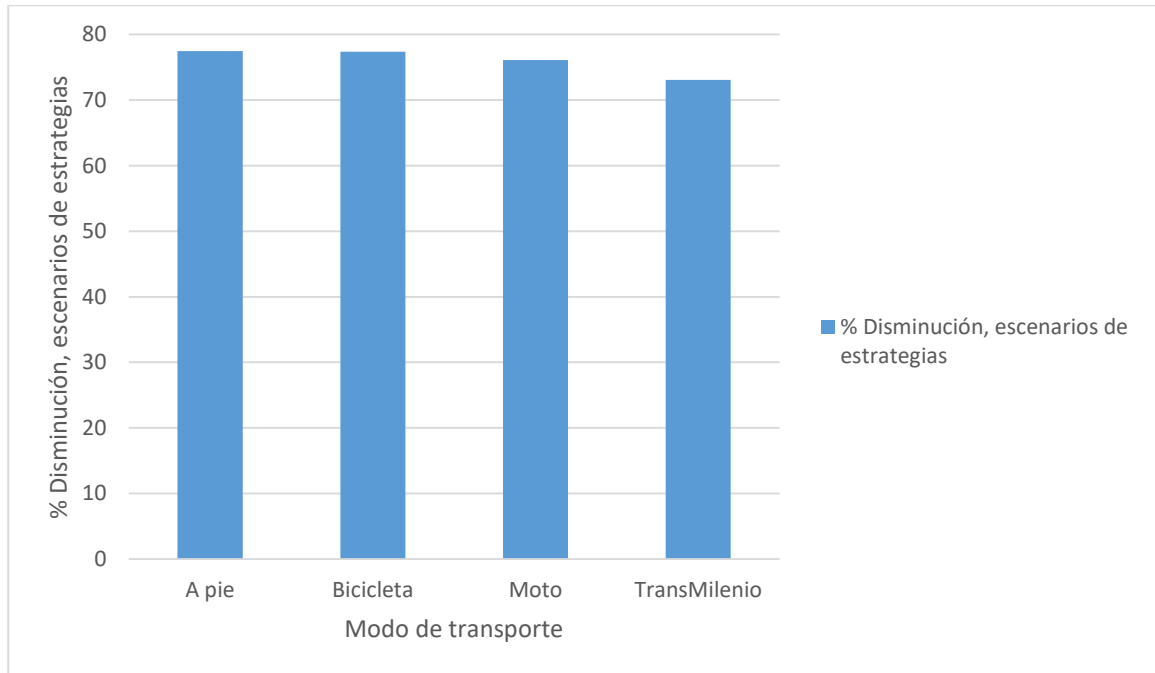
E	Contaminante	Lugar	Concentración simulada + de fondo ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )			
			Moto	A pie	TransMilenio	Bicicleta
1	PM2.5	Estación TM Coliseo	70,7	52,1	51,4	62,4
2	NOx	Estación TM Coliseo	476,9	235,6	369,6	362,6
3	NOx	Estación TM Calle 100	289,1	53,8	1644,1	88,1
4	CO	Estación TM Calle 100	4098,1	664,5	27680,9	1167,5

Tras la consideración de los escenarios de disminución de la contaminación en la concentración simulada más la de fondo, se observa que en la ubicación Calle 100 las mayores concentraciones totales están en el punto de TM seguido del de la moto y de la bicicleta y a pie, es decir como habría de esperarse desde el centro hacia afuera disminuye la concentración. Por otra parte en la ubicación Coliseo las mayores concentraciones se encuentran en el punto para las motos seguido del punto de bicicleta en un caso y de TM en el otro y a pie en el último lugar en un caso y TM en el otro. Finalmente se calcula el porcentaje de disminución, se obtuvo el promedio para cada una de las tres lecturas, por modo de transporte:

Tabla 3.4: Porcentaje de disminución con estrategias de disminución por modo de transporte. Fuente: Autor.

E	Contaminante	Lugar	% Disminución, escenarios de estrategias			
			Moto	A pie	TransMilenio	Bicicleta
1	PM2.5	Estación TM Coliseo	13,8	14,9	18,6	14,5
2	NOx	Estación TM Coliseo	60,0	59,9	40,6	60,4
3	NOx	Estación TM Calle 100	0,0	0,4	12,4	0,3
4	CO	Estación TM Calle 100	2,2	2,3	1,5	2,2
<b>Total</b>			<b>76,1</b>	<b>77,5</b>	<b>73,1</b>	<b>77,4</b>

Figura 3.39: Porcentaje de disminución con escenarios de estrategias por modo de transporte.



Fuente: Autor.

Los peatones y los ciclistas, seguidos de motociclistas y usuarios de TM fueron los más beneficiados por poca diferencia con una mayor disminución de la contaminación tras las estrategias, los que no emiten; los primeros son a quienes les toma más tiempo desplazarse en las calles contaminadas. Es decir tienen mayor tiempo de exposición siendo altamente vulnerables a pesar de que las concentraciones producto de las emisiones de los vehículos sean menores en los senderos peatonales; cálculos hechos por el autor (sin considerar la altitud de Bogotá) y no publicados en este trabajo muestran que es mayor el aumento del tiempo de exposición y por tanto la exposición y dosis que estos inhalan.

## 4. Conclusiones y recomendaciones

### 4.1. Conclusiones

- La agrupación vehicular livianos fue con bastante diferencia el principal emisor de contaminantes seguido de los buses articulados y biarticulados de TM, aportantes a las concentraciones a las que se encuentran expuestos los usuarios de diferentes modos de transporte y por consiguiente deben concentrar el mayor esfuerzo en la implementación de estrategias de disminución de la contaminación, más allá de medidas de control de tráfico vehicular que contribuyen a dicha disminución como lo es el pico y placa que afecta los livianos en la ciudad de Bogotá. Por consiguiente se deben promover e incentivar más fuertemente el uso los vehículos livianos eléctricos, buses articulados y biarticulados de TM con tecnología eléctrica. Debería promoverse aún más que los anteriores, la movilidad en el futuro metro y tranvía eléctrico. En general se observan mayores emisiones en la estación Coliseo que en la Calle 100 excepto para  $\text{NO}_x$ .
- Las concentraciones de los contaminantes que se tienen en las calles de Bogotá en el escenario línea base superan los valores recomendados de exposición y para el  $\text{PM}_{2.5}$  y  $\text{NO}_x$  las estrategias de disminución simuladas, no fueron suficientes para cumplir la norma vigente en 2014. Para CO con el conjunto de medidas de disminución drástica de la contaminación se logra estar mayormente dentro del mayor límite normativo vigente en 2014. El  $\text{NO}_x$  es el contaminante que cuenta con las mayores excedencias a las normativas recomendadas de concentración en el tiempo, con valores superiores a estas en un orden de magnitud inclusive; se debe tener en cuenta que aunque sea la mayoría el  $\text{NO}_2$  no constituye todos los  $\text{NO}_x$  y por eso es posible que haya menos excedencias a la norma.

Además de la hora que representa al tráfico vehicular se evidencia que la velocidad del viento tiene una influencia determinante en las concentraciones finalmente obtenidas. Se aprecia que varios de los puntos de mayor concentración de contaminantes se encuentran alrededor de las estaciones de TM. Hay una tendencia leve de mayores concentraciones en el sentido sur-norte de la vía en ambos sitios de simulación, en la parte superior izquierda.

- Con la aplicación de las estrategias de disminución se observa en general una deficiente disminución de las concentraciones para los contaminantes, siendo aún menor para el  $PM_{2.5}$ . Se debe considerar el efecto de retroalimentación positiva en el caso de la carga de sedimentos finos sL, en el cálculo de la resuspensión de modo que se hace importante poder calcular, cuánto bajaría dicha carga de sedimentos finos con vehículos eléctricos en la mayoría de las categorías vehiculares. Para los  $NO_x$  en los escenarios de disminución 2 y 3, se observa claramente como hay mayores disminuciones. No hay que olvidar que estas reducciones también se tienen que dar en otras fuentes de emisión como la industria para tener un aire más limpio que cumpla con las normas más estrictas.
- Para concentraciones de  $PM_{2.5}$  interiores en buses de TM, estudios reportan valores muy superiores a las concentraciones simuladas en el presente trabajo (que son valores de concentración exterior que deberían ser mayores). Para las bicicletas se tienen valores en general menores a los reportados en otros estudios. En la ubicación a pie se tienen valores inferiores al del estudio reportado, en la ubicación Calle 100 y superiores a este en la ubicación Coliseo. Para el punto en moto se tienen en el presente trabajo valores inferiores al reportado en un estudio. El CO en el interior de buses de TM tiene mayor coherencia que para el  $PM_{2.5}$  también comparado.
- Dentro de los diferentes modos de transporte analizados en este trabajo, en la mayoría de los casos se encontró que las mayores concentraciones se encuentran en los puntos calculados para TM, seguidos de los calculados para las motos y luego las bicicletas y peatones en ese orden. Se debe tener en cuenta que estos dos últimos están expuestos directamente ante la polución siendo que no emiten contaminantes. Los peatones y ciclistas serían los más beneficiados por poca diferencia con una mayor

disminución de la contaminación tras las 4 estrategias de disminución simuladas, lo cual debería convertirse en una realidad pues, son los que no emiten.

Por tanto mientras no se implementen dichas estrategias de disminución como las planteadas en este trabajo u otras, debería recomendarse el uso de tapabocas quirúrgico y máscaras antipolución para gases en sitios tan contaminados como las calles de la ciudad de Bogotá. A los peatones son a quienes les toma más tiempo desplazarse en las calles contaminadas. Es decir tienen mayor tiempo de exposición y dosis ingerida según cálculos en este trabajo (sin considerar la altitud de Bogotá) no publicados.

## 4.2. Recomendaciones

- En el caso de bajas velocidades de viento, como 0,6 m/s, considerar la influencia de la turbulencia inducida por el tráfico que se puede estimar dentro del cálculo de valores estadísticos que tiene WM.
- Se debe considerar el efecto de retroalimentación positiva en el caso de la carga de sedimentos finos  $sL$ , en el cálculo de la resuspensión debido a que al ser menor la emisión directa de  $PM_{2.5}$  y este factor  $sL$ , va a ser menor y por tanto la resuspensión bajará también de modo que se hace importante poder calcular cuánto bajaría dicha carga de sedimentos finos con vehículos eléctricos en la mayoría de las categorías vehiculares. También el que implica el andar en bicicleta o a pie, pues además de los beneficios directos en salud para la persona, indirectamente se favorece un ambiente más sano para todos en otro ciclo de retroalimentación positiva, haciendo que el beneficio sea colectivo y especialmente para quienes deciden andar en bicicleta o a pie para quienes se podría calcular el beneficio.
- Se pueden utilizar estas herramientas de simulación CFD para el diseño de ambientes más sanos tanto en las áreas abiertas como en las cerradas como la cabina de un vehículo a partir de las concentraciones exteriores.

- Para los que se movilizan en vehículos de combustión interna privados (particulares), es decir livianos, automóviles, camionetas, etc. y motociclistas (con su casco); encontrar o desarrollar un modelo que permitiese calcular la exposición personal. También realizar dicho cálculo para los usuarios de transporte público, en este caso TM, tomando como base por ejemplo la modelación del bus articulado en Ansys Fluent realizada por Guevara (Guevara Luna, 2018).
- En un futuro sería bueno hacer una evaluación de la sensibilidad de los resultados a los factores de emisión en distintos escenarios. Como los factores de emisión conllevan incertidumbres, y dado que pueden ser estimadas con metodologías como Monte Carlo sería bueno calcularlas. Además evaluar la dosis de exposición en cada modo de transporte con las condiciones particulares de una ciudad con gran altitud.
- Encontrar una forma de incentivar los camiones eléctricos en la ciudad. Las medidas de disminución de la contaminación en la ciudad, requieren de mayores incentivos para que además de las implementaciones en tecnología eléctrica que actualmente se dan en el SITP, estas lleguen a los vehículos particulares livianos, buses articulados y biarticulados de TM y motocicletas.
- En el caso de tener vehículos eléctricos en todos los tipos de vehículos y un barrido y lavado de calles, sería interesante saber qué pasaría con los valores de sL y resuspensión en vía, ¿Qué tanto bajarían con mayores estrategias de disminución?
- Los senderos peatonales y bicarriles, mientras no se apliquen efectivas estrategias de disminución de la contaminación en las calles, deben quedar lo más alejado posible de éstas o mejor aún contar con calles exclusivas para su uso como es tendencia en Europa. Se aprecia cierta ironía en cuanto a que los que utilizan los modos de transporte sin emisión directa en su uso (pues si hay emisiones en análisis del ciclo de vida de la bicicleta), son quienes directamente expuestos resultan en las calles contaminadas por otros. Se debe seguir promoviendo con más fuerza el ejercicio que implica el andar en bicicleta o a pie, pues además de los beneficios directos en salud para la persona, indirectamente se favorece un ambiente más sano para todos en otro ciclo de retroalimentación positiva, haciendo que el beneficio sea colectivo.

## Anexos

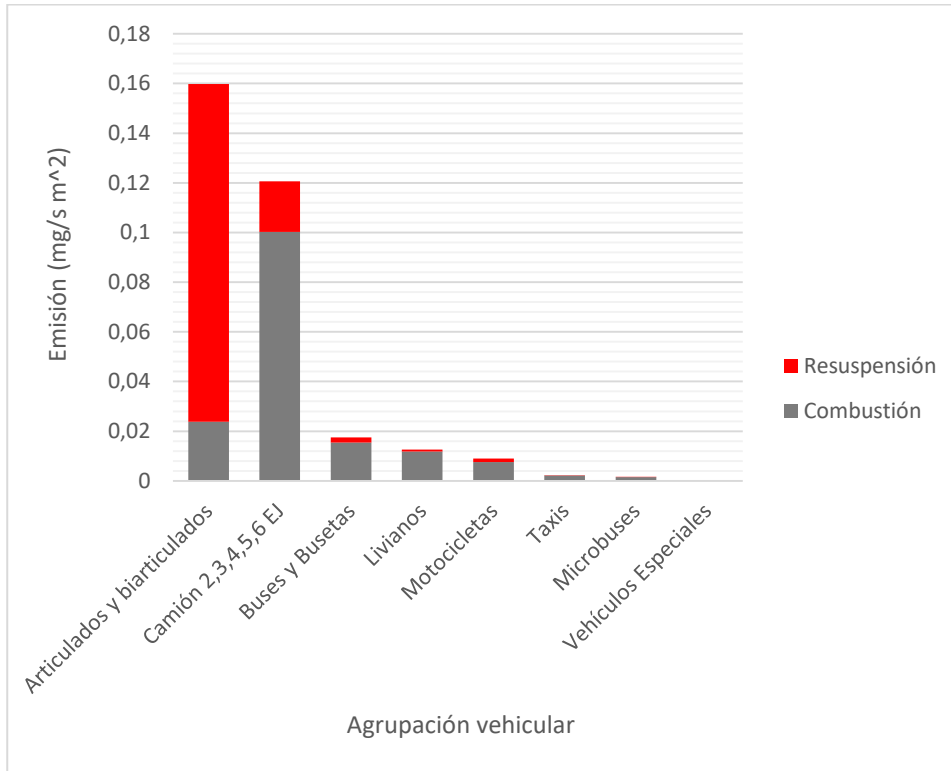
### A. Factores de emisión comparados

Vehículos			PM			NOx			CO		
			(Cuéllar Álvarez, 2016)	(Ramirez, Pachon, Casas, & González, 2019)	Este trabajo (2014)	(Cuéllar Álvarez, 2016)	(Ramirez, Pachon, Casas, & González, 2019)	Este trabajo	(Cuéllar Álvarez, 2016)	(Ramirez, Pachon, Casas, & González, 2019)	Este trabajo
VP y CC	VP	sin TWC ; > 1400 c.c.	0,003	0,004	0,003	2,2	0,1	0,73	69	2,85	69
		con TWC ; >1400 c.c.	0,003		0,003	0,9		0,9	8,5		8,5
		sin TWC ;	0,003		0,003	1,2		1,2	58		58

		< 1400 c.c.									
		con TWC ; < 1400 c.c.	0,003		0,003	0,7		0,73	7,2		7,2
	CC	ACPM	---	0,07	0,097	---	1,4	1,01	---	2,12	1,39
		Gasolina	---	0,006	0,003	---	0,34	2,17	---	4,24	43,1
<b>Taxis</b>	---	Gasolina	0,003	---	0,003	2	---	2	8,4	---	8,4
<b>Microbuses</b>	---	Gasolina	---	---	0,035	---	---	4,9	---	---	33,4
<b>Buses y Busetas</b>	Pasajeros	35-60	1,21	---	0,114	15,2	---	11,5	9,1	---	30,3
		19-32	0,256	---		9,8	---		5,9	---	
		16-19	0,029	---		6	---		3,3	---	
<b>Buses escolares/turismo</b>	---	ACPM	---	---	0,612	---	---	13,4	---	---	8
<b>Buses TM</b>	---	ACPM	0,286	0,41	0,083	17,1	20,1	16,8	248,2	6,75	15,7
<b>C1,4,6</b>	---	ACPM	---	0,95	0,653	---	21,6	8,4	---	5,37	27,2
<b>C2,3,5,7</b>	---	ACPM	---	0,22	0,528	---	4,1	9,3	---	6,01	10,6
<b>Motos</b>	4T	< 150 cm <sup>3</sup>	0,008	0,022	0,008	0,8	0,56	0,8	38	16,41	38,0
		>150 cm <sup>3</sup>	0,016		0,016	1,1		1,1	50,7		50,7

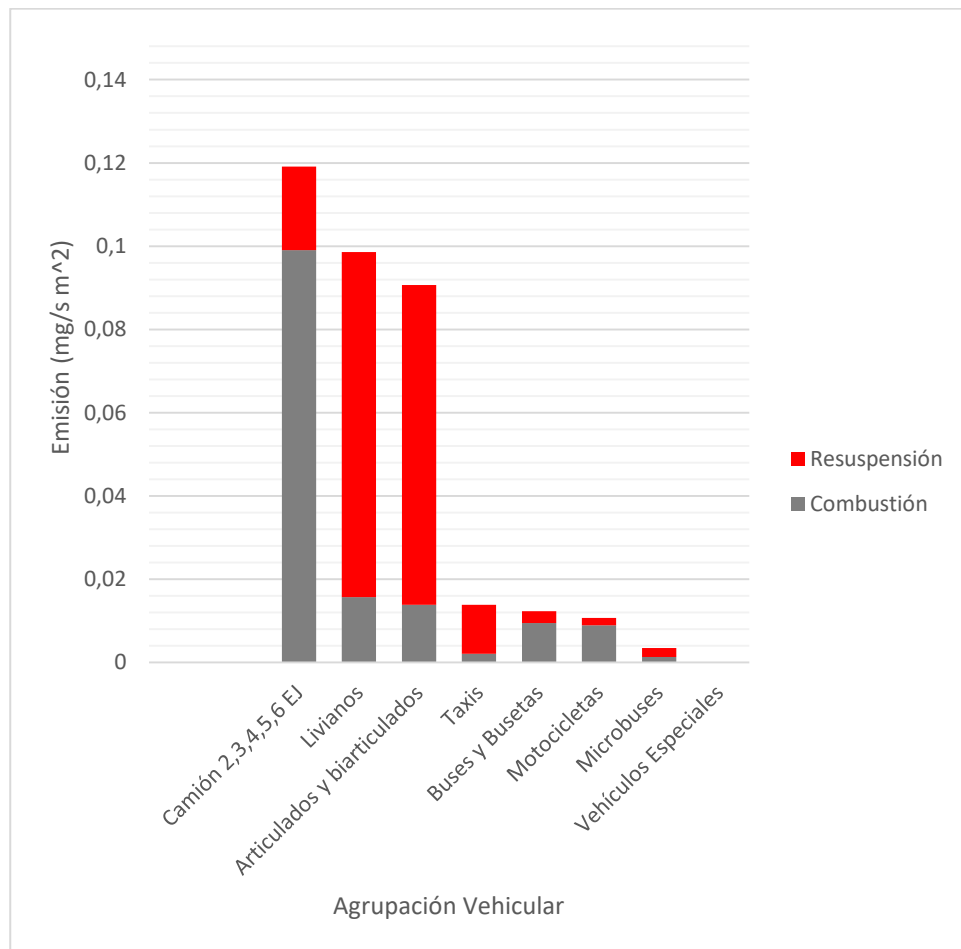
## B. Emisiones con estrategias de disminución

PM<sub>2.5</sub>, estación Calle 100, estrategia 1 de disminución.



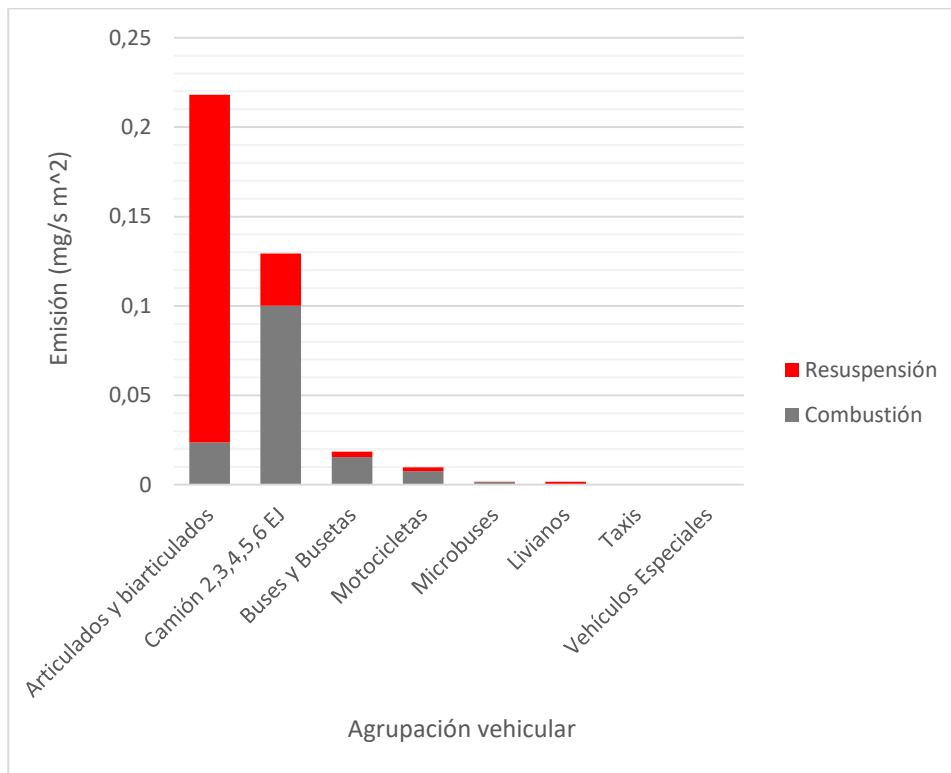
Fuente: Autor.

PM<sub>2.5</sub>, estación Coliseo, estrategia 1 de disminución.



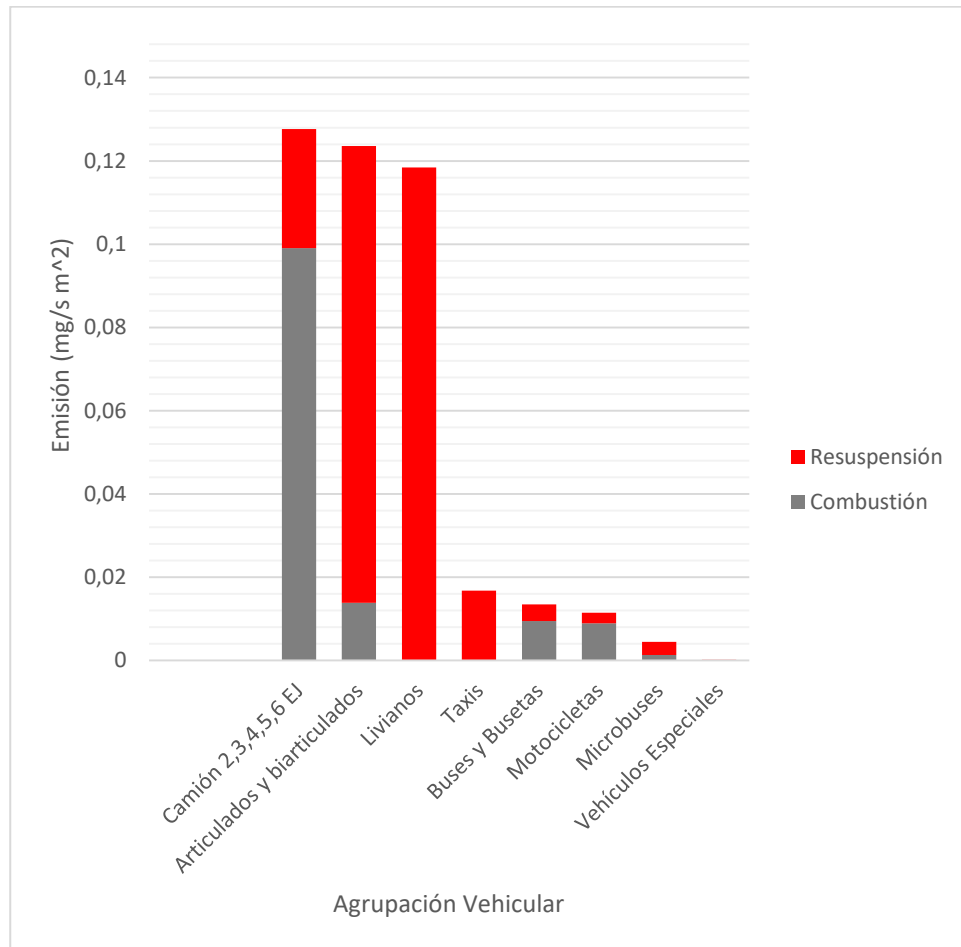
Fuente: Autor.

PM<sub>2.5</sub>, estación Calle 100, estrategia 2 de disminución.



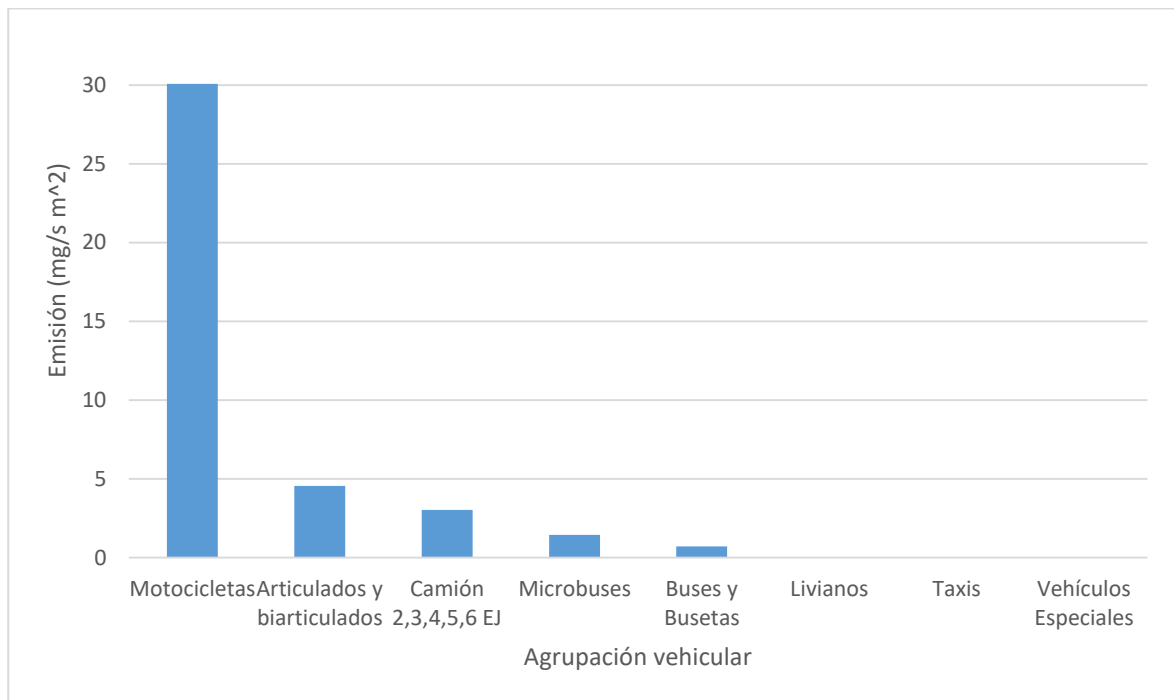
Fuente: Autor.

PM<sub>2.5</sub>, estación Coliseo, estrategia 2 de disminución.



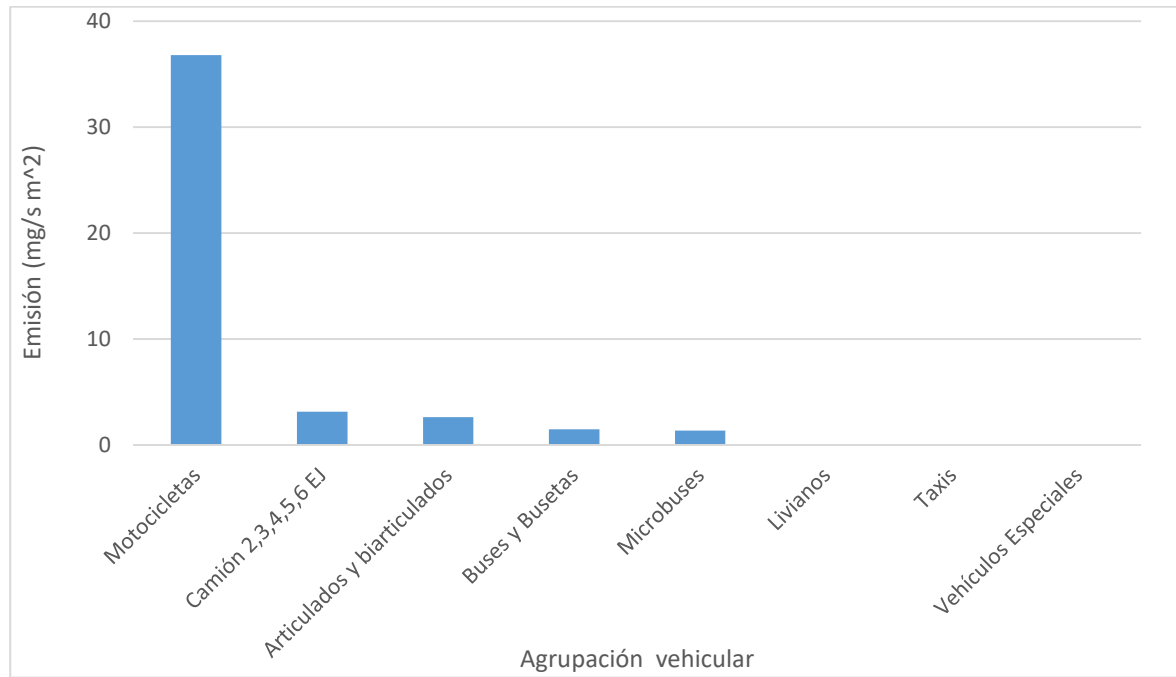
Fuente: Autor.

CO, estación Calle 100, estrategia de disminución 2.



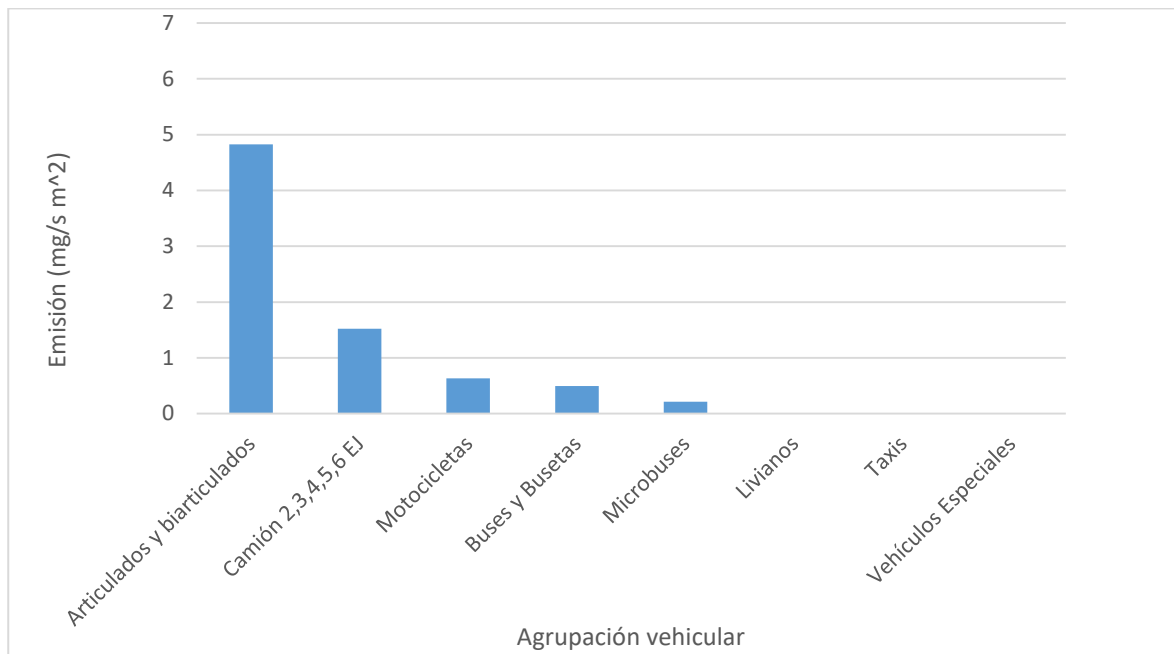
Fuente: Autor.

CO, estación Coliseo, estrategia de disminución 2.



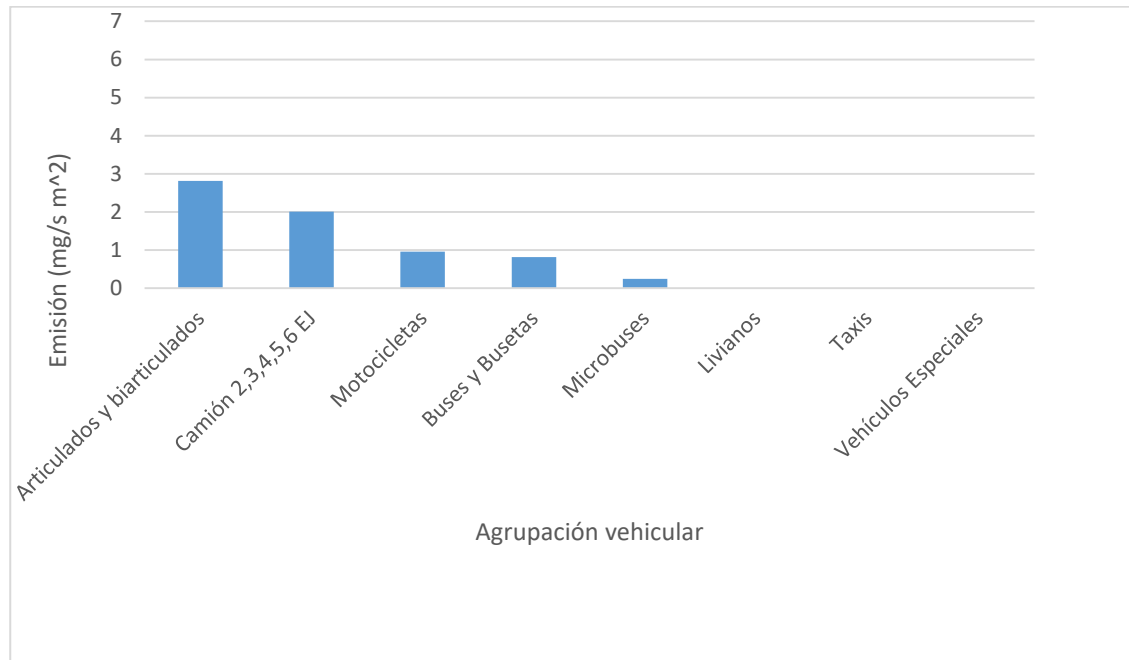
Fuente: Autor.

NO<sub>x</sub>, estación Calle 100, estrategia de disminución 2.



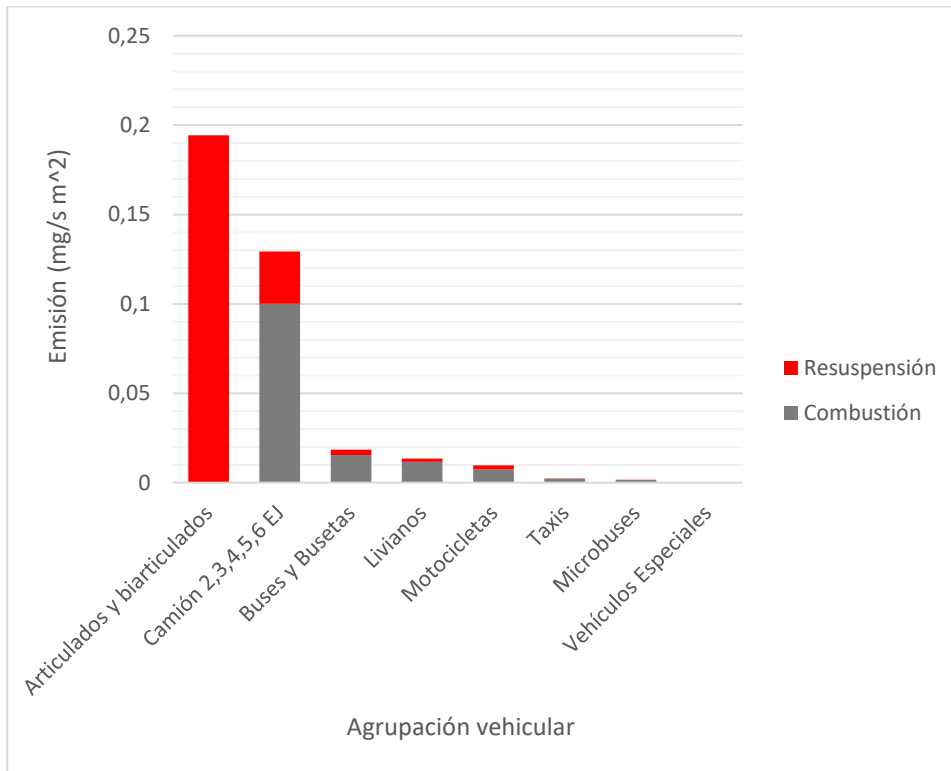
Fuente: Autor.

NO<sub>x</sub>, estación Coliseo, estrategia de disminución 2.



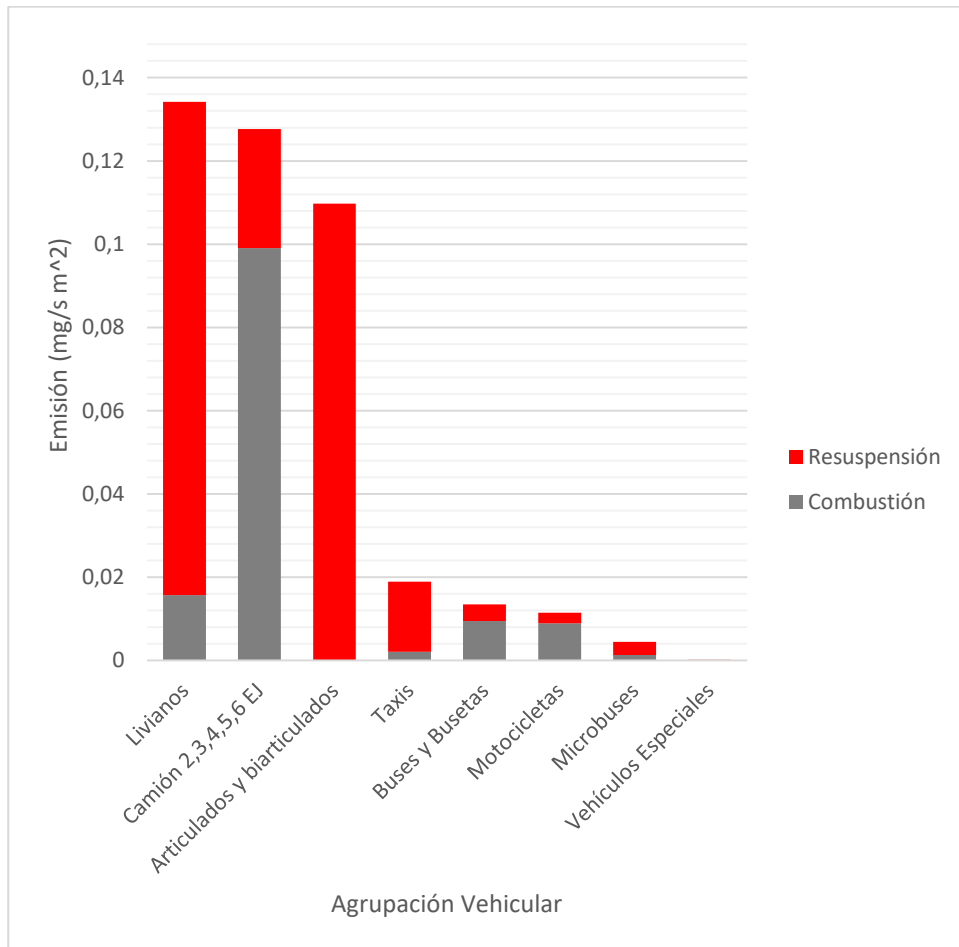
Fuente: Autor.

PM<sub>2.5</sub>, estación Calle 100, estrategia de disminución 3.



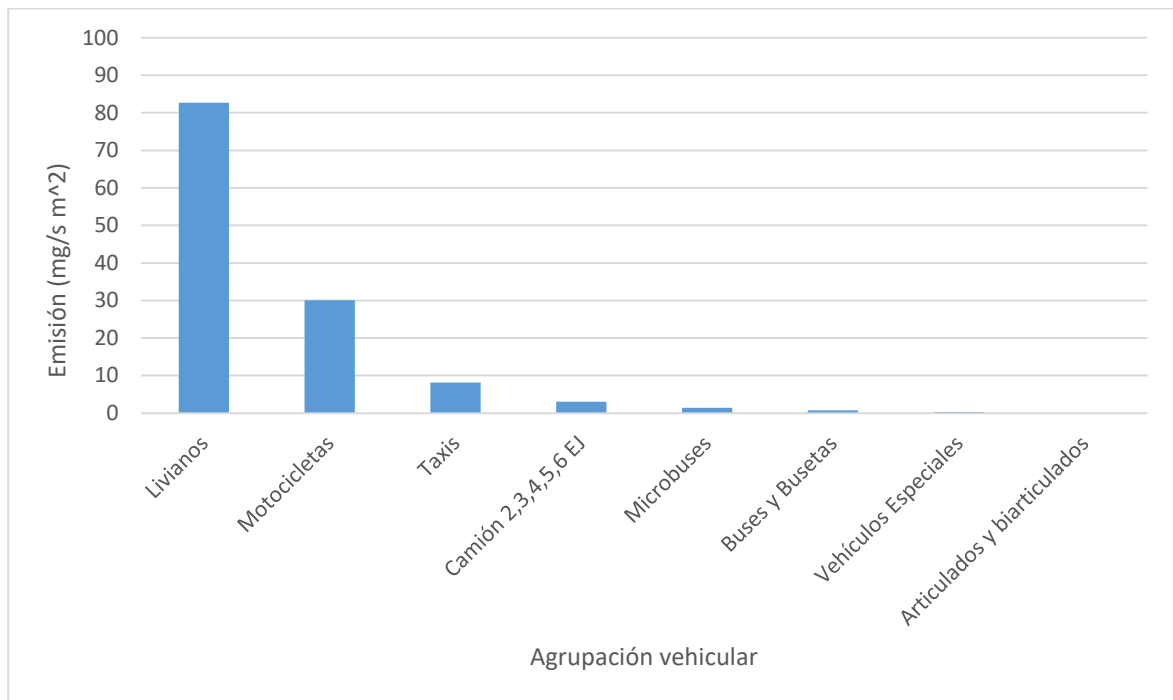
Fuente: Autor.

PM<sub>2.5</sub>, estación Coliseo, estrategia de disminución 3.



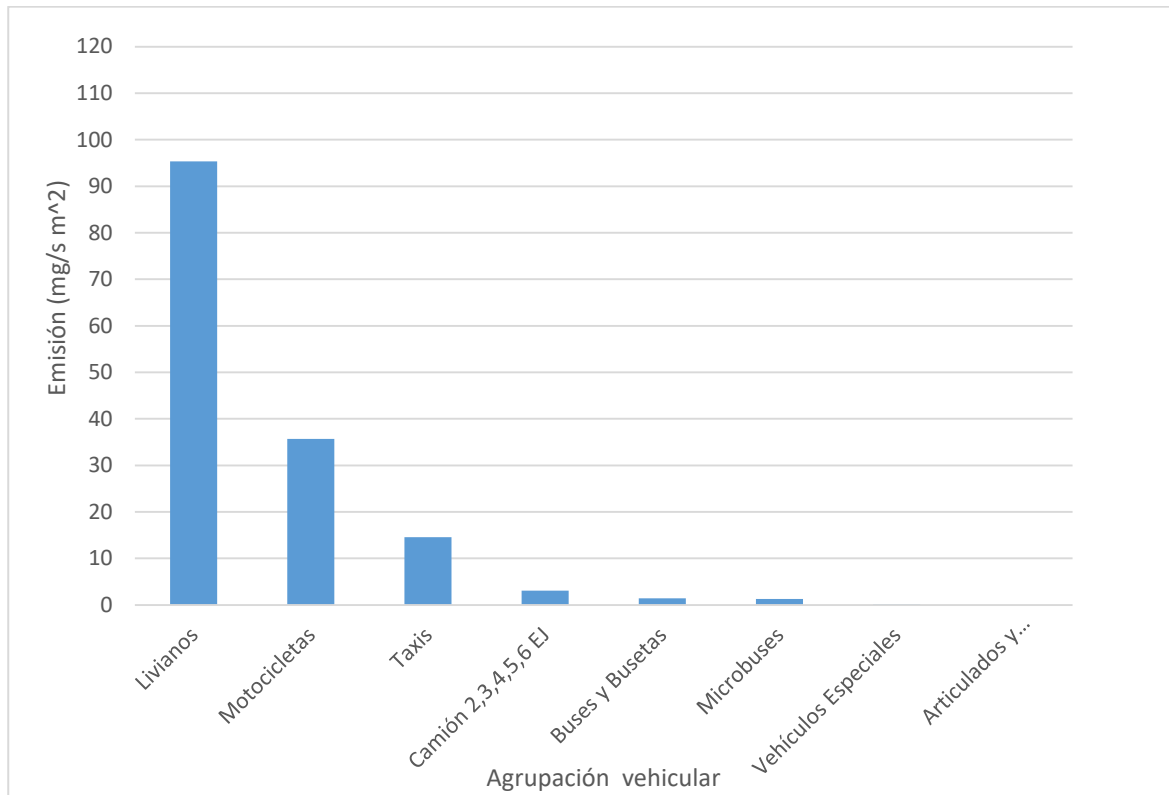
Fuente: Autor.

CO, estación Calle 100, estrategia de disminución 3.



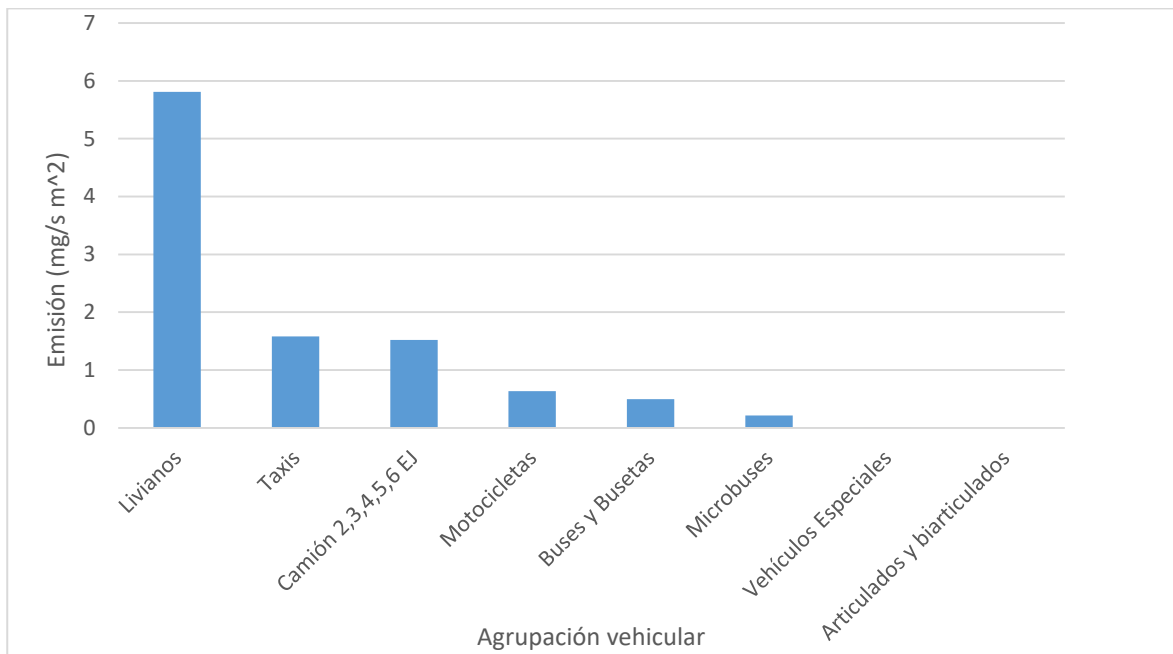
Fuente: Autor.

CO, estación Coliseo, estrategia de disminución 3.



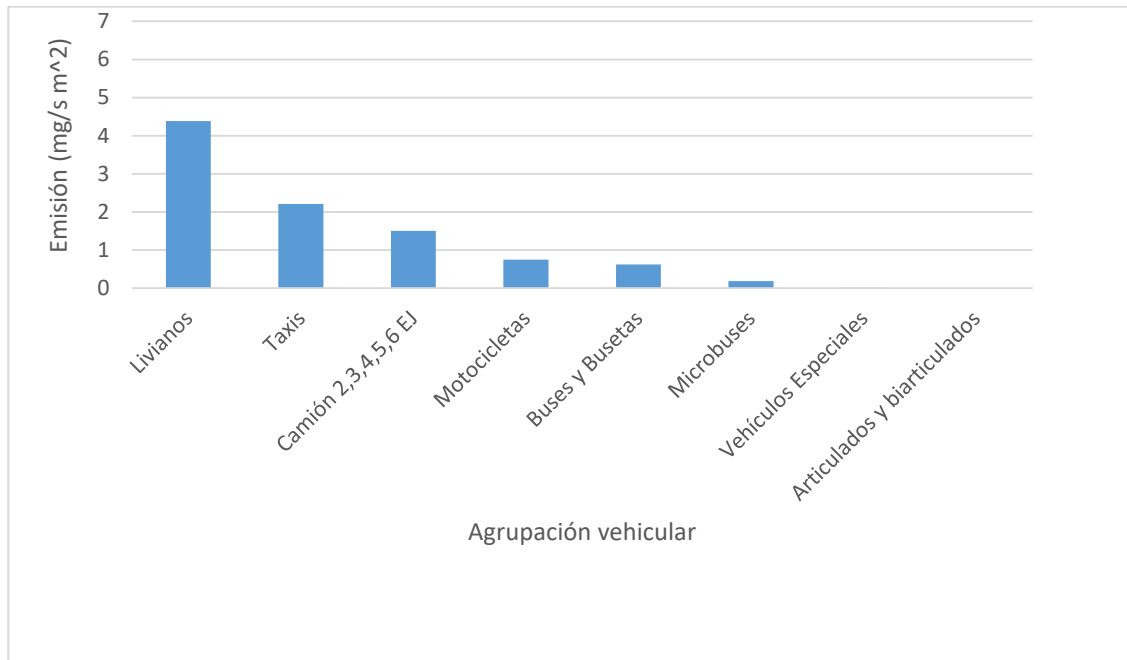
Fuente: Autor.

NO<sub>x</sub>, estación Calle 100, estrategia de disminución 3.



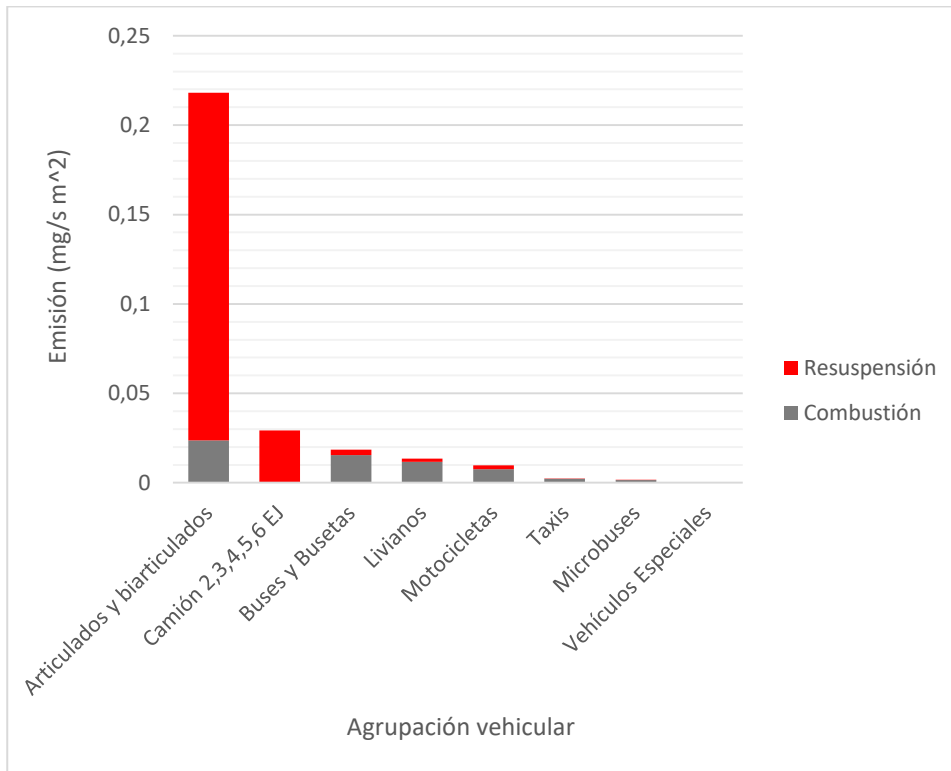
Fuente: Autor.

NO<sub>x</sub>, estación Coliseo, estrategia de disminución 3.

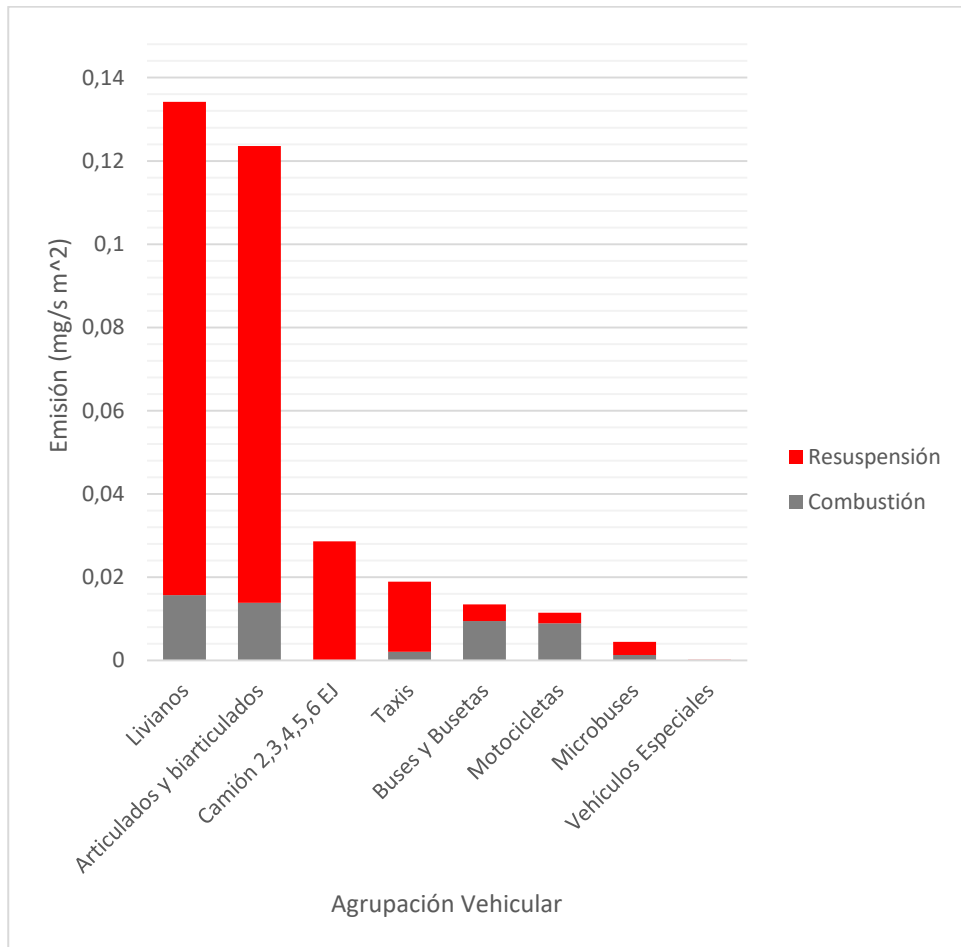


Fuente: Autor.

PM<sub>2.5</sub>, estación Calle 100, estrategia de disminución 4.

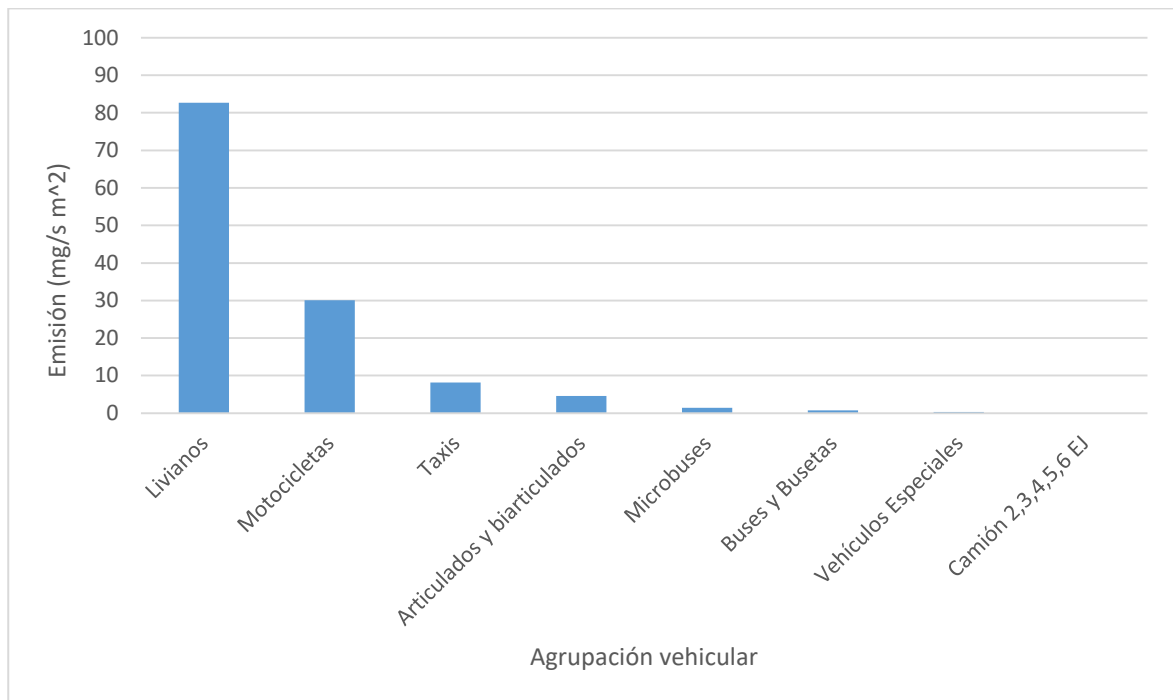


Fuente: Autor.

PM<sub>2.5</sub>, estación Coliseo, estrategia de disminución 4.

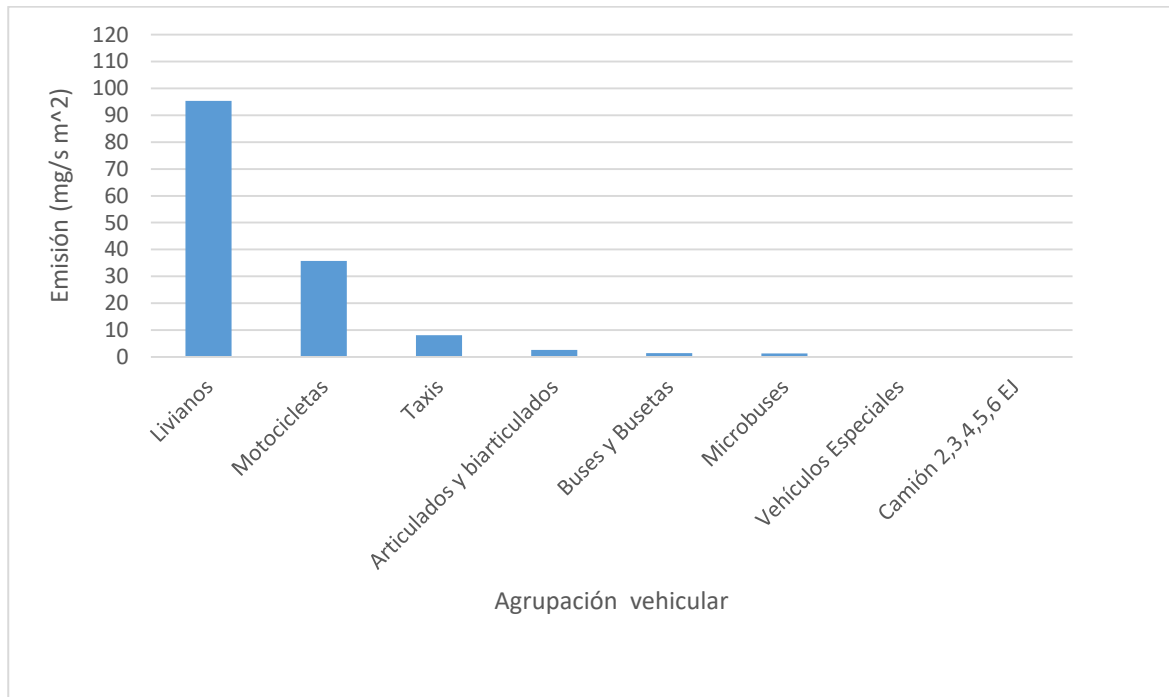
Fuente: Autor.

CO, estación Calle 100, estrategia de disminución 4.

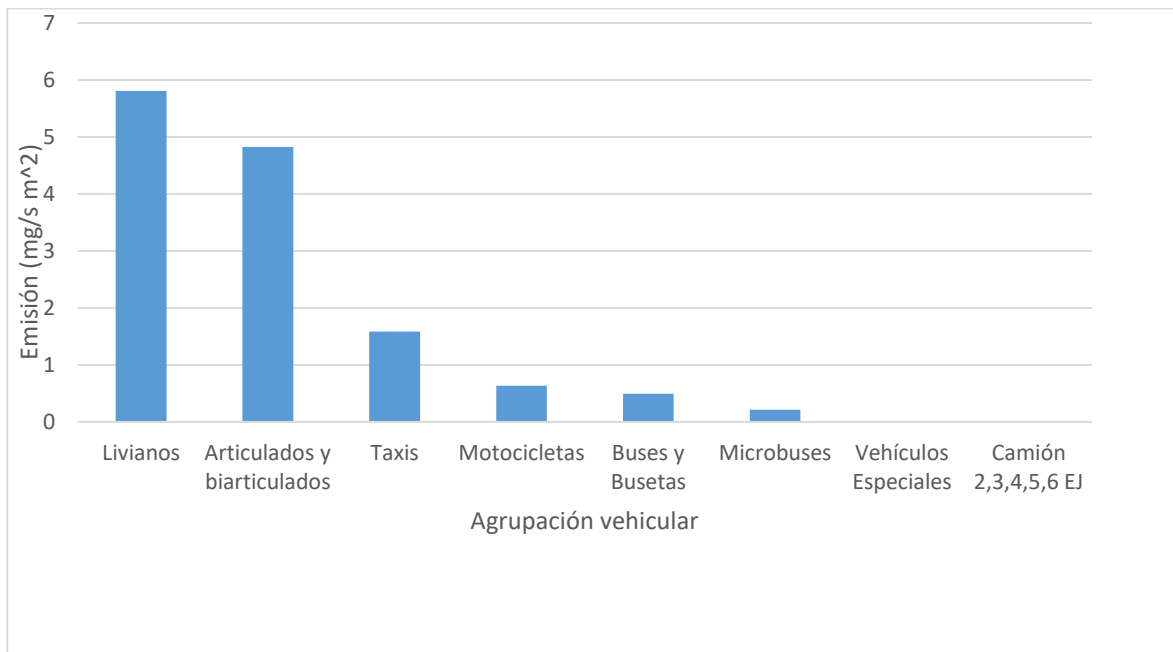


Fuente: Autor.

CO, estación Coliseo, estrategia de disminución 4.

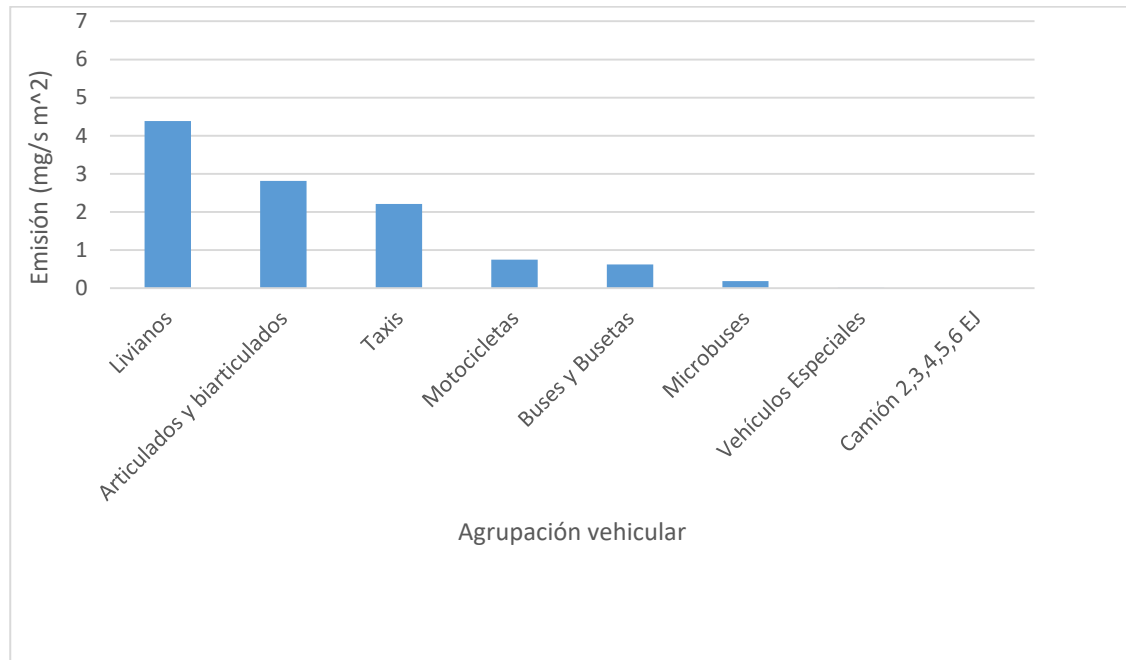


Fuente: Autor.

NO<sub>x</sub>, estación Calle 100, estrategia de disminución 4.

Fuente: Autor.

NO<sub>x</sub>, estación Coliseo, estrategia de disminución 4.



Fuente: Autor.

## Bibliografía

Belalcazar, L. C. (2009) *Alternative Techniques to Assess Road Traffic Emissions*. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. Disponible en: [http://infoscience.epfl.ch/record/140447/files/EPFL\\_TH4504.pdf](http://infoscience.epfl.ch/record/140447/files/EPFL_TH4504.pdf).

Belalcazar, L. C. y Zamudio, A. (2013) "Validación e implementación de un modelo de dinámica computacional de fluidos (CFD) para simular la dispersión de contaminantes a nivel de calle.", en Bogotá. Disponible en: [http://www.ing.unal.edu.co/grupos/calidad\\_aire/doc/eventos/casap3\\_Resumen Belalcazar & Zamudio.pdf](http://www.ing.unal.edu.co/grupos/calidad_aire/doc/eventos/casap3_Resumen%20Belalcazar%20&%20Zamudio.pdf).

Beltran, D., Belalcazar, L. C. y Rojas, N. (2012) "Emisiones vehiculares de material particulado (pm2.5 y pm10 ) por resuspensión de polvo y abrasión en Bogotá", *ACODAL*, pp. 25–32.

Briggs, D. J. *et al.* (2008) "Effects of travel mode on exposures to particulate air pollution", *Environment International*, 34(1), pp. 12–22. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412007001249> (Accedido: 1 de diciembre de 2013).

Castillo-Camacho, M. P. *et al.* (2020) "Personal Exposure to PM2.5 in the Massive Transport System of Bogota and Medellin, Colombia", *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 14(3), pp. 210–224. doi: 10.5572/ajae.2020.14.3.210.

Chang, H. H., Fuentes, M. y Frey, H. C. (2012) "Time series analysis of personal exposure to ambient air pollution and mortality using an exposure simulator.", *Journal of exposure science & environmental epidemiology*. Nature America, Inc., 22(5), pp. 483–8. doi: 10.1038/jes.2012.53.

Cuéllar Álvarez, Y. (2016) "Análisis de Ciclo de Vida para diferentes fuentes energéticas usadas en los vehículos de transporte de pasajeros de la ciudad de Bogotá".

Donnelly, R. P., Lyons, T. J. y Flassak, T. (2009) "Evaluation of results of a numerical simulation of dispersion in an idealised urban area for emergency response modelling", *Atmospheric Environment*, 43(29), pp. 4416–4423. doi: 10.1016/j.atmosenv.2009.05.038.

Eichhorn, J. (2008) "MISKAM".

Eichhorn, J. (2018) "WinMiskam ... Miskam for Windows Manual". Disponible en: [http://download.lohmeyer.de/Manual WinMISKAM.pdf](http://download.lohmeyer.de/Manual%20WinMISKAM.pdf).

EPA (2011a) "AP 42 Compilation of Air Emissions Factors, Fifth Edition, Volume I Chapter 13: Miscellaneous Sources 13.2.1-1 13.2.1 Paved Roads 13.2.1.1 General". Disponible en: <https://www3.epa.gov/ttnchie1/ap42/ch13/final/c13s0201.pdf> (Accedido: 25 de noviembre de 2021).

EPA (2011b) "Exposure Factors Handbook: 2011 Edition". National Center for Environmental Assessment, National Technical Information Service, pp. 1–1436. doi: EPA/600/R-090/052F.

Fajardo, O. a. y Rojas, N. Y. (2012) "Particulate matter exposure of bicycle path users in a high-altitude city", *Atmospheric Environment*. Elsevier Ltd, 46, pp. 675–679. doi: 10.1016/j.atmosenv.2011.09.047.

Fajardo, O. A. y Rojas, N. Y. (2012) "Particulate matter exposure of bicycle path users in a high-altitude city", *Atmospheric Environment*. Elsevier Ltd, 46, pp. 675–679. doi: 10.1016/j.atmosenv.2011.09.047.

Franco Gantiva, J. A. (2014) "Estimación y Comparación de Exposición Personal a PM2.5 en Diferentes Modos de Transporte en la Ciudad de Bogotá, Colombia.", 5, pp. 1–19. Disponible en: <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/16938/u703246.pdf?sequence=1>.

Franco, J. F. *et al.* (2007) "Efectos de los sistemas de transporte en calidad del aire y salud infantil", en *I Congreso Colombiano de Calidad del Aire y Salud Pública*. Manizales. Disponible en: [http://www.ing.unal.edu.co/eventos/casap2006/imagenes/Presentaciones\\_Congreso/dia03/manana/juan\\_franco.pdf](http://www.ing.unal.edu.co/eventos/casap2006/imagenes/Presentaciones_Congreso/dia03/manana/juan_franco.pdf).

Franco, J. F. *et al.* (2013) "Exposición a PM2.5 y Carbono elemental en ciclorutas de bogotá: impacto del tráfico vehicular", en *4to Congreso Colombiano y Conferencia Internacional de Calidad del Aire y Salud Pública*. Bogotá.

García, H. (2010) "Restricciones ontológicas en la política de calidad del aire en Bogotá", *revista de ingeniería. Universidad de los Andes*, (30), pp. 122–133.

Gromke, C. y Ruck, B. (2008) "On the Impact of Trees on Dispersion Processes of Traffic Emissions in Street Canyons", *Boundary-Layer Meteorology*, 131(1), pp. 19–34. doi: 10.1007/s10546-008-9301-2.

Guerrero, O. (2013) *Desarrollo de una metodología para evaluar la cobertura espacial de la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire de Bogotá*. Universidad Nacional de Colombia.

Guevara Luna, F. A. (2018) "Implementación y validación de un modelo CFD para simular la dispersión de material particulado PM 2.5 al interior de buses de transporte público".

Hernandez-Gonzalez, A. y Jiménez, R. (2011) "Desarrollo de un inventario georeferenciado de emisiones de dióxido de carbono por fuentes móviles en el área urbana de Bogotá", en.

Hsieh, C. y Wu, K. (2012) "Climate-Sensitive Urban Design Measures for Improving the

Wind Environment for Pedestrians in a Transit-Oriented Development Area”, *Journal of Sustainable Development*, 5(4), p. p46. doi: 10.5539/jsd.v5n4p46.

Huang, J. *et al.* (2012) “Comparisons of personal exposure to PM2.5 and CO by different commuting modes in Beijing, China”, *Science of The Total Environment*, 425, pp. 52–59. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969712003397> (Accedido: 1 de diciembre de 2013).

Int Panis, L. *et al.* (2010) “Exposure to particulate matter in traffic: A comparison of cyclists and car passengers”, *Atmospheric Environment*, 44(19), pp. 2263–2270. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231010003225> (Accedido: 1 de diciembre de 2013).

Kaur, S., Nieuwenhuijsen, M. J. y Colvile, R. N. (2007) “Fine particulate matter and carbon monoxide exposure concentrations in urban street transport microenvironments”, *Atmospheric Environment*, 41(23), pp. 4781–4810. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231007001343> (Accedido: 11 de diciembre de 2013).

Kingham, S. *et al.* (2013) “Variations in exposure to traffic pollution while travelling by different modes in a low density, less congested city”, *Environmental Pollution*, 181, pp. 211–218. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749113003540> (Accedido: 1 de diciembre de 2013).

Kryłów, M. y Generowicz, A. (2019) “Impact of street sweeping and washing on the pm10 and PM2.5 concentrations in cracow (Poland)”, *Rocznik Ochrona Srodowiska*, 21(1), pp. 691–711.

Liu, X. y Frey, H. C. (2011) “Modeling of in-vehicle human exposure to ambient fine particulate matter”, *Atmospheric Environment*, 45(27), pp. 4745–4752. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231011003888> (Accedido: 3 de diciembre de 2013).

MADS (2010) *Resolución 610 de 2010 Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial*. Disponible en: <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=39330&dt=S> (Accedido: 27 de julio de 2022).

MADS (2017) “RESOLUCIÓN No. 2254 01 NOV 2017”. Disponible en: <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/Resolucion-2254-de-2017.pdf> (Accedido: 11 de junio de 2020).

Marshall, J. D. y Behrentz, E. (2005) “Vehicle Self-Pollution Intake Fraction: Children’s Exposure to School Bus Emissions”, *Environmental Science & Technology*, 39(8), pp. 2559–2563. doi: 10.1021/es040377v.

McNabola, A., Broderick, B. M. y Gill, L. W. (2009) “A numerical investigation of the impact of low boundary walls on pedestrian exposure to air pollutants in urban street canyons”, *Science of The Total Environment*, 407(2), pp. 760–769. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969708010164> (Accedido: 1 de diciembre de 2013).

Morales Betancourt, R. *et al.* (2017) "Exposure to fine particulate, black carbon, and particle number concentration in transportation microenvironments", *Atmospheric Environment*. Elsevier Ltd, 157(1), pp. 135–145. doi: 10.1016/j.atmosenv.2017.03.006.

Morales Betancourt, R. *et al.* (2022) "Toward Cleaner Transport Alternatives: Reduction in Exposure to Air Pollutants in a Mass Public Transport". doi: 10.1021/acs.est.1c07004.

de Nazelle, A. *et al.* (2012) "A travel mode comparison of commuters' exposures to air pollutants in Barcelona", *Atmospheric Environment*, 59, pp. 151–159. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231012004621> (Accedido: 1 de diciembre de 2013).

Nyhan, M., McNabola, A. y Misstear, B. (2014) "Comparison of particulate matter dose and acute heart rate variability response in cyclists, pedestrians, bus and train passengers", *Science of The Total Environment*, 468, pp. 821–831. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969713010231> (Accedido: 1 de diciembre de 2013).

Oróstegui, O. (2019) *Preocupa crecimiento de parque automotor en Bogotá - Bogotá Cómo Vamos*. Disponible en: [https://bogotacomovamos.org/author/admin\\_bcv/page/12/](https://bogotacomovamos.org/author/admin_bcv/page/12/) (Accedido: 25 de enero de 2022).

Pachón, J. E. *et al.* (2016) "Exposure assessment to high-traffic corridors in bogota using a near-road air quality model", *Springer Proceedings in Complexity*, pp. 403–407. doi: 10.1007/978-3-319-24478-5\_66.

Peñaloza, N. E. (2010) *Distribución espacial y temporal del inventario de emisiones provenientes de las fuentes móviles y fijas de la ciudad de Bogotá D.C.* Universidad Nacional de Colombia.

Pospisil, J. y Jicha, M. (2007) "Computational Model for Transient Pollutants Dispersion in City Intersection and Comparison with Measurements", en Borrego, C. y Norman, A.-L. (eds.) *Air Pollution Modeling and Its Application XVII*, pp. 207–214.

Ramirez, J. *et al.* (2019) "A new database of on-road vehicle emission factors for Colombia: A case study of bogota", *CTyF - Ciencia, Tecnología y Futuro*, 9(1), pp. 73–82. doi: 10.29047/01225383.154.

Ren, L. *et al.* (2022) "Exposure Assessment of Traffic-Related Air Pollution Based on CFD and BP Neural Network and Artificial Intelligence Prediction of Optimal Route in an Urban Area", *Buildings*, 12(8). doi: 10.3390/buildings12081227.

Rodríguez, P. A. y Behrentz, E. (2009) *Actualización del inventario de emisiones de fuentes móviles para la ciudad de Bogotá a través de mediciones directas*. Universidad de Los Andes. Disponible en: [https://biblioteca.uniandes.edu.co/Tesis\\_12009\\_primer\\_semestre/524.pdf](https://biblioteca.uniandes.edu.co/Tesis_12009_primer_semestre/524.pdf).

SDA (2010) *Plan Decenal de Descontaminación del Aire para Bogotá*. Disponible en: [http://ambientebogota.gov.co/en/c/document\\_library/get\\_file?uuid=b5f3e23f-9c5f-40ef-912a-51a5822da320&groupId=55886](http://ambientebogota.gov.co/en/c/document_library/get_file?uuid=b5f3e23f-9c5f-40ef-912a-51a5822da320&groupId=55886).

SDA (2017) *DOCUMENTO TÉCNICO DE SOPORTE MODIFICACIÓN DEL DECRETO 98 DE 2011*.

SDA (2020) *Inventario de Emisiones de Bogotá, Contaminantes Atmosféricos*.

SDA (2022a) *Calidad del aire: consulta el borrador de Decreto para la construcción de las Zonas Urbanas por un Mejor Aire - ZUMA*. Disponible en: [https://www.ambientebogota.gov.co/es/noticias-de-ambiente1/-/asset\\_publisher/CWsNLtoGa4f6/content/calidad-del-aire-consulta-el-borrador-de-decreto-para-la-construccion-de-las-zonas-urbanas-por-un-mejor-aire-zuma?fbclid=frwertyjtbcvnnv](https://www.ambientebogota.gov.co/es/noticias-de-ambiente1/-/asset_publisher/CWsNLtoGa4f6/content/calidad-del-aire-consulta-el-borrador-de-decreto-para-la-construccion-de-las-zonas-urbanas-por-un-mejor-aire-zuma?fbclid=frwertyjtbcvnnv) (Accedido: 2 de diciembre de 2022).

SDA (2022b) *Inventario de emisiones 2020: transporte público (SITP) redujo emisiones de PM 2.5 en un 37 %*. Disponible en: [https://www.ambientebogota.gov.co/noticias-de-ambiente1/-/asset\\_publisher/CWsNLtoGa4f6/content/sitp-redujo-emisiones-de-pm?\\_101\\_INSTANCE\\_CWsNLtoGa4f6\\_redirect=https%3A%2F%2Fwww.ambientebogota.gov.co%2Fnoticias-de-ambiente1%3Fp\\_id%3D101\\_INSTANCE\\_CWsNLtoG](https://www.ambientebogota.gov.co/noticias-de-ambiente1/-/asset_publisher/CWsNLtoGa4f6/content/sitp-redujo-emisiones-de-pm?_101_INSTANCE_CWsNLtoGa4f6_redirect=https%3A%2F%2Fwww.ambientebogota.gov.co%2Fnoticias-de-ambiente1%3Fp_id%3D101_INSTANCE_CWsNLtoG).

SDM (2022) *¿Cuáles son los tipos de vehículos exceptuados de la restricción de pico y placa establecida para vehículos particulares, requisitos y procedimiento para la inscripción?* | *Secretaría Distrital de Movilidad*. Disponible en: [https://www.movilidadbogota.gov.co/web/preguntas\\_frecuentes/cuales\\_son\\_los\\_tipos\\_de\\_vehiculos\\_exceptuados\\_de\\_la\\_restriccion\\_de\\_pico\\_y\\_placa](https://www.movilidadbogota.gov.co/web/preguntas_frecuentes/cuales_son_los_tipos_de_vehiculos_exceptuados_de_la_restriccion_de_pico_y_placa) (Accedido: 24 de enero de 2022).

UNAL (2012) “Emisiones y Eficiencia Energética : tecnologías del servicio troncal y zonal del SITP de Bogotá”, (013).

UNAL (2013) “Informe motos Versión Abril 9 de 2013-1”. Disponible en: [Dropbox%5CClima%5CInformación SDA para Modelo%5CBackup INFORMACION TECNICA CONVENIO 013 UNAL%5CULTIMA ENTREGA](#).

Vardoulakis, S. *et al.* (2014) “Modelling air quality in street canyons : a review”.

WHO (2021) “WHO global air quality guidelines”, *Coastal And Estuarine Processes*, pp. 1–360.

WHO, W. H. O. (2005) *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre*. Disponible en: [http://whqlibdoc.who.int/hq/2006/WHO\\_SDE\\_PHE\\_OEH\\_06.02\\_spa.pdf?ua=1](http://whqlibdoc.who.int/hq/2006/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf?ua=1).

WHO, W. H. O. y IPCS, I. P. C. S. (2005) “Principles of characterizing and applying human exposure models.”, en. Disponible en: <http://www.inchem.org/documents/harmproj/harmproj/harmproj3.pdf>.

Zamudio, A. (2016) *ESTRATEGIAS PARA MITIGAR LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE EN ZONAS ALEDAÑAS A GRANDES AVENIDAS DE BOGOTÁ*. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/59910/11510626.2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

Zárate, E. *et al.* (2007) “Air quality modelling over Bogota, Colombia: Combined techniques to estimate and evaluate emission inventories”, *Atmospheric Environment*, (41).

Zhu, S., Demokritou, P. y Spengler, J. (2010) "Experimental and numerical investigation of micro-environmental conditions in public transportation buses", *Building and Environment*, 45(10), pp. 2077–2088. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132310000831> (Accedido: 2 de diciembre de 2013).