



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

FACULTAD DE QUÍMICA

TESIS MANCOMUNADA

**ESTUDIO DE LAS VARIACIONES ESPACIO-TEMPORALES
DE LA EXPOSICIÓN PERSONAL A CONTAMINANTES
ATMOSFÉRICOS EN MICROAMBIENTES DE TRANSPORTE
DE LA CIUDAD DE MÉXICO**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO**

PRESENTAN

**BRANDON MONTIEL DE LA CRUZ
ELIZABETH SÁNCHEZ MARTÍNEZ**



CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX, 2023.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas

Tesis Digitales

Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: Profesor: Gema Luz Andraca Ayala
VOCAL: Profesor: José Agustín García Reynoso
SECRETARIO: Profesor: Iván Yassmany Hernández Paniagua
1^{er}. SUPLENTE: Profesor: María Rafaela Gutiérrez Lara
2^{do}. SUPLENTE: Profesor: Alejandra Mendoza Campos

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, Ciudad Universitaria,
CDMX.

ASESOR DEL TEMA

Dr. Iván Yassmany Hernández Paniagua

SUSTENTANTES

Brandon Montiel de la Cruz

Elizabeth Sánchez Martínez

AGRADECIMIENTOS

A mi alma mater, la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Química por el aprendizaje, las vivencias y los retos que me presentaron durante estos años, los cuales me han formado como la persona que soy ahora y han definido aquello en lo que quiero desempeñarme, además del cómo. Al Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático (ICAyCC), por facilitar el uso de sus instalaciones e instrumentos y a su plantilla laboral por el apoyo recibido para poder llevar a cabo este proyecto.

Al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) por el financiamiento recibido para la realización de este trabajo, a través del proyecto IA103021 “Exposición personal a la contaminación atmosférica en el transporte público”.

Al Dr. Iván Yassmany Hernández Paniagua, mi asesor, por abrirme la puerta para este trabajo. Su paciencia, dedicación y palabras me llevaron a poder realizar este trabajo y a tener la frente en alto durante todos los desafíos que se presentaron durante la realización de este.

A la Dra. Gema Luz Andraca Ayala, mi supervisor técnico, por su apoyo para concluir de manera satisfactoria este trabajo, además, por su genuina preocupación por la integridad de mis compañeros y mía durante los muestreos y dentro del ICAyCC.

Al Dr. Arón Jazcilevich Diamant por su interés sobre el desarrollo del proyecto y por los consejos sobre el mismo.

A la M. en C. Leticia Martínez Romero por su ayuda para la realización de los experimentos de gravimetría.

Al M. en C. José Manuel Hernández Solís y la Dra. Bertha Eugenia Mar Morales por el apoyo recibido para la realización de las actividades del presente proyecto.

Al Ing. Wilfrido Gutiérrez López por el apoyo recibido con el mantenimiento de los instrumentos utilizados en el presente proyecto.

Al Ing. León Manuel García y Espinosa de los Reyes por el apoyo recibido con el mantenimiento de los instrumentos utilizados en el presente proyecto.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	6
2. MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES	8
2.1. ¿Qué es el PM?.....	8
2.2. Composición PM _{2.5}	10
2.3. Efectos en la salud	11
2.4. Daños al ambiente	14
2.5. Límites establecidos	14
2.6. La exposición personal a PM _{2.5}	16
3. OBJETIVOS	19
3.1. Objetivo General.....	19
3.2. Objetivos Particulares.....	19
4. METODOLOGÍA.....	20
4.1. Diseño experimental	20
4.2. Descripción de la zona de estudio	22
4.2.1. Av. Miguel Ángel de Quevedo	22
4.2.2. Av. Revolución.....	26
4.3. Campañas de muestreo.....	28
4.3.1. Instrumentación	28
4.3.2. Calibración de los monitores personales de PM _{2.5}	31
5. RESULTADOS	33
5.1. Exposición personal a PM _{2.5} en Av. MAQ.....	33
5.1.1. Comparación entre medios activos y móviles	35
5.1.2. Mapas.....	36
5.2. Exposición personal a PM _{2.5} en Av. REV	42
5.2.1. Comparación entre medios activos y móviles	43
5.2.2. Mapas.....	44
5.3. Comparación de la exposición personal a PM _{2.5} durante el cambio de Trolebús entre 2020 y 2021.	49
5.3.1. Mapas.....	50
5.4. Exposición e inhalación en diferentes medios de transporte.....	54

6.	DISCUSIÓN.....	59
6.1.	Comparación entre avenidas	59
6.2.	Comparación con estudios previos en la CDMX	60
6.3.	Normatividad y Riesgo.....	61
7.	CONCLUSIONES	65
8.	REFERENCIAS	67
9.	ANEXOS.....	71
	Anexo I. Memoria de cálculo de exposición	71
	Anexo II. Memoria de cálculo de inhalación	73
	Anexo III. Memoria de cálculo de coeficiente de riesgo.....	75

1. INTRODUCCIÓN

Las actividades diarias de la población generan emisiones de contaminantes que modifican la composición natural del aire. La quema de combustibles fósiles para el transporte y la generación de energía tanto a nivel industrial como doméstico, por ejemplo, producen miles de toneladas de contaminantes que diariamente son emitidos a la atmósfera. En áreas urbanas, los vehículos automotores son la principal fuente de emisión de algunos contaminantes atmosféricos como el monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno ($\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$), hidrocarburos policíclicos aromáticos (HPAs), entre otros (SEDEMA, 2018).

Un contaminante atmosférico se define como un compuesto que altera nocivamente la concentración normal del aire ambiente. La calidad del aire es el estado de la concentración de los diferentes contaminantes atmosféricos en un periodo de tiempo y lugar determinados. Estos contaminantes pueden ser emitidos de manera directa (contaminantes primarios) ya sea de una fuente natural o antropogénica, como es el caso del CO y el dióxido de nitrógeno (NO_2). También existen los llamados contaminantes secundarios, los cuales son resultado de reacciones químicas entre contaminantes primarios y otros componentes del aire y/o radiación solar. Por ejemplo, el ozono troposférico (O_3) que se forma de la reacción entre el NO_2 y compuestos orgánicos volátiles (COVs) (INE, 2010).

El material particulado (PM) es una mezcla compleja de sustancias en estado líquido y/o sólido, que permanece suspendida en la atmósfera por periodos variables de tiempo, pueden definirse como primario (producido directamente por alguna fuente contaminante) o secundario (formado en la atmósfera como resultado de la interacción química entre gases y partículas primarias) (NOM-025-SSA1, 2014). De acuerdo con su diámetro aerodinámico, el PM se clasifica en partículas menores o iguales a 10 micras (PM_{10}), en menores o iguales a 2.5 micras ($\text{PM}_{2.5}$) y menores o iguales a 0.1 micras ($\text{PM}_{0.1}$) conocidas como ultrafinas. El tamaño del PM es un parámetro importante para caracterizar su comportamiento en la atmósfera y, por ende, la concentración a la que puede estar expuesta la población. También

determina la capacidad de penetración y retención en diversas regiones de las vías respiratorias (NOM-025-SSA1, 2014).

La exposición personal a contaminantes atmosféricos incluyendo el PM se ha asociado con diferentes daños a la salud humana y la magnitud de estos depende de las concentraciones de contaminantes que se encuentra en el aire, la dosis inhalada, el tiempo y la frecuencia de exposición, así como de las características de la población expuesta (Falcon-Rodriguez et al., 2016). Estudios epidemiológicos existentes sobre la mortalidad por exposición a largo plazo a PM_{2.5}, han revelado un incremento de la mortalidad del 6 % por fallos respiratorios, 11 % por causas cardiovasculares, 18 % por enfermedades isquémicas del corazón y 37 % en el caso de cáncer de pulmón, lo cual ha sido asociado a un aumento de 10 $\mu\text{g m}^{-3}$ en la concentración ambiente (INSP, 2016).

Disminuir y controlar la emisión de partículas contaminantes es de gran relevancia a nivel mundial. Debido a esto se ha publicado una extensa cantidad de artículos relacionados al tema existiendo así un amplio banco de datos de concentración de exposición en microambientes. Teniendo en cuenta lo antes mencionado, el presente proyecto tiene como finalidad realizar una comparación de los niveles de exposición a PM_{2.5} en microambientes de transporte en las avenidas principales de la Ciudad de México (CDMX), Miguel Ángel de Quevedo (MAQ) y Revolución (REV).

2. MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES

2.1. ¿Qué es el PM?

El PM es conocido también como partículas suspendidas, aeropartículas, o aerosoles, es una mezcla de compuestos microscópicos en forma de líquidos y/o sólidos de interés público debido los efectos nocivos que puede tener sobre el medioambiente y la salud humana (INECC, 2011). Las PMs pueden contener productos químicos y/o elementos biológicos, metales, sales, materiales carbonosos, compuestos volátiles (COVs), hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) y endotoxinas que pueden interactuar entre sí formando otros compuestos (Suárez-Salas et al., 2017). Una característica relevante de las PMs es su tamaño, ya que a menor diámetro aerodinámico mayor es su capacidad de penetrar hasta áreas más profundas del sistema respiratorio. Las PMs finas que tienen un diámetro aerodinámico menor a $2.5\text{ }\mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2.5}$) y las ultrafinas menores a $1\text{ }\mu\text{m}$ (PM_1) son las de mayor interés en términos de salud (INECC, 2005).

El material particulado PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$ es parte de los seis contaminantes criterio del aire regulados a nivel mundial, junto con el ozono (O_3), monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO_2) y dióxido de nitrógeno (NO_2) (INE, 2010). Las PMs pueden provenir de los automóviles, camiones, fábricas, quema de madera y otras actividades. (OEHHA, 2020). Cada tipo de PM está compuesto de diferente material y puede provenir de distintas fuentes (Figura 1). Las PMs primarias pueden tener su origen en fuentes naturales o fuentes antropogénicas. Por otro lado, las PMs secundarias pueden generarse a través de los procesos de formación que incluyen la condensación de gases de baja presión de vapor en la superficie de las partículas existentes, la coagulación de partículas pequeñas, reacción de gases en o sobre las partículas, evaporación de neblina y gotas de agua en las que los gases se han disuelto y reaccionado siendo estas las partículas finas. Con ayuda de la interacción de estas partículas anteriormente mencionadas sumado al movimiento browniano, tenemos procesos de sedimentación causados por la aglomeración, generando así las partículas gruesas.

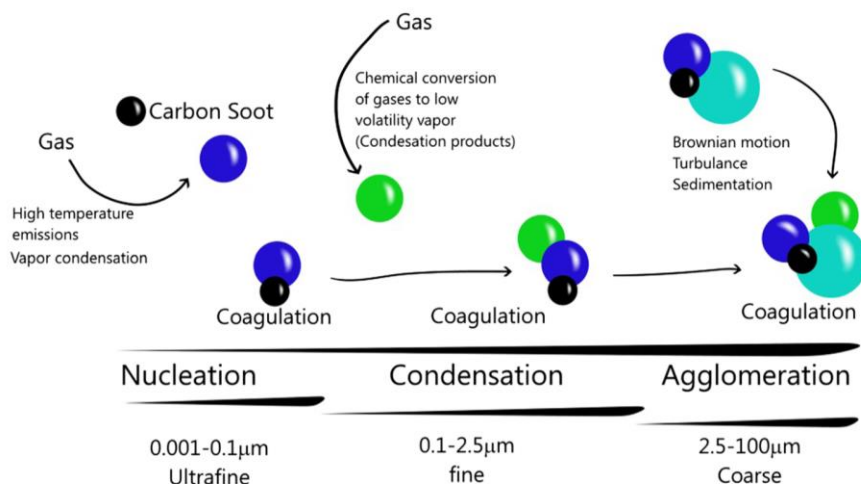


Figura 1. Procesos de formación de PMs y su dinámica atmosférica. Tomada de Falcon et al. (2016).

Fuentes naturales: Las fuentes naturales se definen como aquellas que emiten contaminantes atmosféricos sin la participación de las actividades humanas. Por ejemplo, las sales marinas, la erosión, resuspensión del suelo, incendios naturales, actividad volcánica, material biológico, microorganismos, polen, etc.

Fuentes antrópicas: Las fuentes antrópicas abarcan las emisiones generadas por las actividades humanas, algunos ejemplos de ellas son las emisiones de automóviles, la quema de biomasa, combustión incompleta de combustibles fósiles, polvos fugitivos de caminos pavimentados y no pavimentados, actividades agrícolas, de construcción, procesos industriales, procesos metalúrgicos, etc. Estas mismas se subdividen en:

- **Fuentes fijas o estacionarias:** Estas fuentes se refieren a toda instalación establecida en un solo lugar y que tenga como propósito desarrollar procesos industriales, comerciales, servicios o actividades que generen o puedan generar emisiones contaminantes a la atmósfera, generadas a través de actividades de combustión u otras actividades llevadas cabo dentro de la fuente.
- **Fuentes de área:** Aquellas fuentes que son demasiado numerosas y dispersa, pero que en conjunto son emisoras significativas de contaminantes.

Ejemplo de ellas son las gasolineras, tintorerías, actividades de construcción, quemas agrícolas, resuspensión de polvos de caminos, entre otras.

- **Fuentes móviles:** Todas las fuentes motorizadas con autorización para circular por caminos públicos, como motocicletas, vehículos de pasajeros, camiones y autobuses, así como aquellas que no circulan por carretera, como maquinaria de uso agrícola, locomotoras, embarcaciones marinas, maquinaria para construcción, entre otras (INECC, 2011).

2.2. Composición PM_{2.5}

Existen diferentes tipos de PM dependiendo de su composición, por ejemplo, partículas de escape diésel (DEP) se produce por combustión diésel y está constituido por metales de transición, como vanadio y zinc, y también por hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) (Tabla 1). Las cenizas volantes de petróleo residual (ROFA) que es una mezcla compleja de sulfatos y compuestos de nitrógeno, carbono y metales (principalmente vanadio). Y las partículas de aire urbano (UAP) del valle de Utah que se identificaron en los Estados Unidos de América, pero se convirtieron en una denominación general para cualquier UAP en todo el mundo, debido a sus altos niveles de metales de transición (Falcon et al., 2016).

Tabla 1. Composición típica del PM suspendido en el aire ambiente.

Composición	Elementos	Composición	Elementos
Metales	K, Ca, Ga, Sr, Zr	PAHs	AcPy
	Ba, Na, Li, Be, Ti, Sn, Mg		Ant
	Al, Cs, Bi		BaA
	Sb		BaFL
Metales de transición	Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn		BaP
	Cd, Au, V, Hg, Nb, Ti, Co		Bg, h, iP
	Mo		BaP-TEQs
	Zr		Pireno Tóxico
	Rb, Ag		Chr
Metaloides	B, As, Se		Flu
	S		Fl
	Sb		Nap
Lantanidos y actinidos	Sm, U		InP
	Tb		BkF
	Ce, La		Phe
Biológicos	Gluganos		Pireno
	Endotoxinas	Otros	Sulfatos y nitratos de amonio
	Polen		paraformaldehído
	Virus		
Carbón	Elemental		
	Orgánico		

Tomada de Falcon et al. (2016).

Una vez emitidas al ambiente, las PM_{2.5} pueden ser transportadas desde algunos hasta miles de kilómetros de la fuente de emisión y permanecer en la atmósfera durante días a semanas, hasta que sean removidas por deposición seca o húmeda (SEMARNAT, 2015). La deposición seca se produce cuando las partículas transportadas por el viento inciden sobre una superficie y se depositan sobre ella. En cuanto a la deposición húmeda, la precipitación recoge las partículas de la atmósfera y las transporta hasta la superficie terrestre, o bien, con la incorporación de partículas atmosféricas y gases en las gotas que forman las nubes y con la subsecuente remoción de la atmósfera como lluvia o nieve (INECC, 2013).

2.3. Efectos en la salud

La toxicidad del PM depende por un lado de su composición química y por lo tanto de la fuente de emisión, pero sobre todo depende del tamaño de las partículas, puesto que éste determina que tanto penetran en el árbol bronquial (Quénel et al.,

2003). Las PM_{10} son filtradas por la nariz y son deglutidas, las PM de 10 a $2.5\ \mu m$ se depositan principalmente en la tráquea y los bronquios y alteran (Figura 2), por ejemplo, la respuesta inflamatoria alveolar regulada por los macrófagos ante el virus sincitial respiratorio, una causa frecuente de pulmonía viral en los niños (Romieu & Korc, 2002). Las partículas menores a $2.5\ \mu m$ llegan en gran cantidad a los alvéolos (Quénel et al., 2003). El $PM_{2.5}$ que penetra al epitelio alveolar inicia un proceso de inflamación pulmonar, que presenta igualmente cambios inflamatorios sistémicos que afectan la coagulación de la sangre, lo cual puede obstruir los vasos sanguíneos, provocando angina o hasta infarto al miocardio (Riojas-Rodríguez et al., 2009).

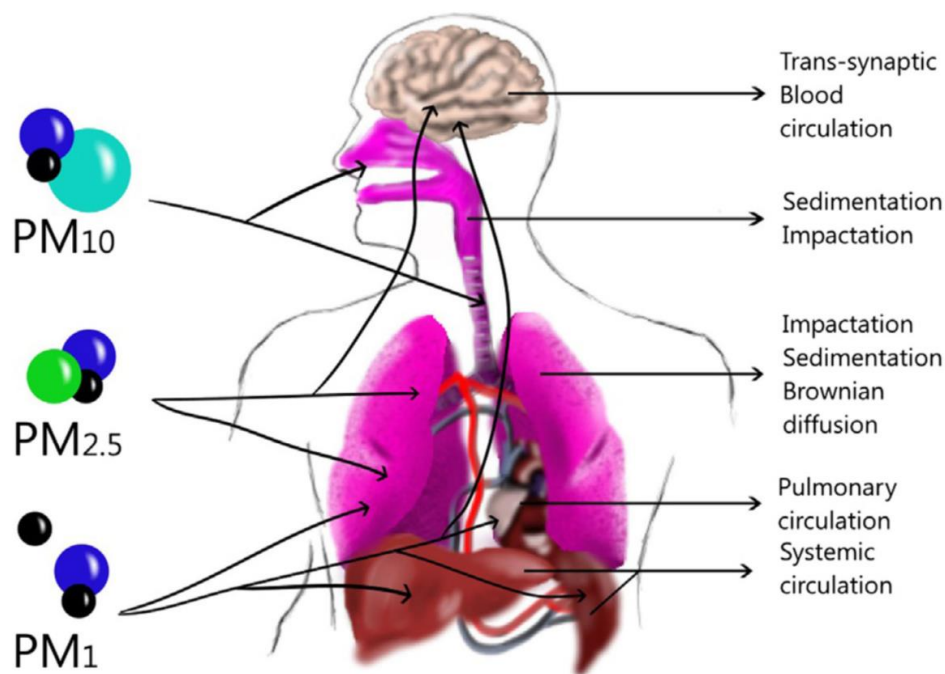


Figura 2. Penetración del material particulado en el organismo. Tomada de Falcon et al. (2016).

La Figura 2 muestra que el tamaño de las PMs es una característica fundamental ya que, dependiendo de este, se puede conocer la penetración que tendrá la partícula en el sistema respiratorio. Las PMs de mayor tamaño se alojarán en las partes superiores del tracto respiratorio, debido a la sedimentación o impacto de estas, pudiendo llegar a depositarse dentro de los alvéolos a causa del movimiento

browniano (Falcon et al., 2016). Por otro lado, las partículas ultrafinas pueden llegar a trasladarse al flujo sanguíneo y depositarse en el hígado, bazo y hasta el cerebro (Cortes, 2018).

En relación a la contaminación por metales pesados en las PM, se ha observado una serie de efectos negativos en la salud como taquicardia, incremento de la presión sanguínea y anemia causada por el efecto inhibitorio de la hematopoyesis (Krewski & Rainham, 2007). También se ha identificado incrementos en los niveles de triglicéridos, neurotoxicidad, daños al riñón tales como una disfunción inicial tubular evidenciada por un incremento en la excreción de proteínas de bajo peso molecular, el cual progresa en un decremento del ritmo de filtración glomerular. Los metales pesados también incrementan el riesgo de formación de nefrocalcinosis y de cáncer renal.

Las PM se han asociado a su vez con el aumento de síntomas de enfermedades respiratorias, la reducción de la función pulmonar, el agravamiento del asma y con muertes prematuras por afecciones respiratorias y cardiovasculares. Estudios epidemiológicos documentan los efectos de las PM en la salud a nivel mundial y en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM). Por ejemplo, el PM se ha asociado con mortalidad, en especial con mortalidad infantil (SEMARNAT, 2020) y con el ausentismo escolar en niños (Romieu et al., 1992). Las PM y el O₃ se han asociado a efectos respiratorios en niños asmáticos y a variabilidad en la frecuencia cardíaca en adultos mayores (Riojas-Rodríguez et al., 2009).

La Organización Mundial de la Salud (OMS) estima que en 2016, aproximadamente el 58 % de las muertes prematuras relacionadas con la contaminación atmosférica (4.2 millones) se debieron a cardiopatías isquémicas y accidentes cerebrovasculares, mientras que el 18 % de las muertes se debieron a enfermedad pulmonar obstructiva crónica e infecciones respiratorias agudas, y el 6 % de las muertes se debieron al cáncer de pulmón (WHO, 2008). En las Directrices de la OMS sobre la Calidad del Aire se estima que una reducción media anual de las concentraciones de PM₁₀ de 35 a 10 µg m⁻³, común en muchas ciudades en desarrollo económico, permitiría reducir el número de defunciones relacionadas con

la contaminación del aire en aproximadamente un 15 %. Sin embargo, incluso en la Unión Europea, donde las concentraciones de PM de muchas ciudades cumplen con los niveles fijados en las estas Directrices, se estima que la exposición a partículas de origen antropogénico reduce la esperanza media de vida en 8.6 meses (WHO, 2018).

2.4. Daños al ambiente

Cuando las PM se depositan en la superficie terrestre, puede provocar una serie de daños debido a todos los compuestos que contiene. Por ejemplo, se ha observado una reducción en la fotosíntesis, cambios en la salinidad del suelo, reducción del crecimiento, disminución de los procesos reproductivos, reducción de la presencia de microorganismos, entre otros (SEMARNAT, 2015). Además, se ha reportado que durante su permanencia en la atmósfera, las PM provocan la disminución de la visibilidad, además de impactar en el cambio climático, mediante la dispersión y absorción de radiación infrarroja y térmica o por la modificación de las propiedades de la nubosidad. Los efectos radiactivos de las PM se producen de dos formas: el efecto directo, por el que las partículas dispersan y absorben radiación infrarroja solar y térmica, y el efecto indirecto, en el que las partículas modifican las propiedades de la nubosidad (INECC, 2016).

2.5. Límites establecidos

Según la OMS, la contaminación con PMs conlleva efectos sanitarios incluso a muy bajas concentraciones; de hecho, no se ha podido identificar ningún umbral por debajo del cual no se hayan observado daños para la salud. Por consiguiente, los límites de la directriz de 2021 de la OMS se orientan a lograr las concentraciones de PMs más bajas posibles (Tabla 2). Estos se establecen utilizando como referencia los grupos más sensibles de la población, como niños, adultos mayores y personas con padecimientos respiratorios y cardiovasculares (Contreras et al., 2013).

- Partículas finas (PM_{2.5})
 - 5 µg m⁻³ de media anual
 - 15 µg m⁻³ de media en 24h
- Partículas gruesas (PM₁₀)
 - 15 µg m⁻³ de media anual
 - 45 µg m⁻³ de media en 24h

Tabla 2. Niveles recomendados de las directrices sobre la calidad del aire y metas intermedias. Tomada de la Guía de Calidad del Aire, WHO (2021).

Contaminante	Tiempo promedio	Meta intermedia				Nivel de las directrices sobre la calidad del aire
		1	2	3	4	
MP _{2,5} , µg/m ³	Anual	35	25	15	10	5
	24 horas ^a	75	50	37,5	25	15
MP ₁₀ , µg/m ³	Anual	70	50	30	20	15
	24 horas ^a	150	100	75	50	45
O ₃ , µg/m ³	Temporada alta ^b	100	70	–	–	60
	8 horas ^a	160	120	–	–	100
NO ₂ , µg/m ³	Anual	40	30	20	–	10
	24 horas ^a	120	50	–	–	25
SO ₂ , µg/m ³	24 horas ^a	125	50	–	–	40
CO, mg/m ³	24 horas ^a	7	–	–	–	4

^a Percentil 99 (es decir, 3-4 días de superación por año).

^b Promedio de las concentraciones máximas diarias de O₃ (medias octohorarias) en los seis meses consecutivos con la concentración media móvil de O₃ más alta.

Además de los valores, las Directrices sobre la Calidad del Aire establecen metas intermedias para concentraciones de PM₁₀ y PM_{2.5} destinadas a promover una reducción gradual, de concentraciones altas a otras más bajas (WHO, 2018). Si se alcanzaran esas metas intermedias se podrían esperar reducciones importantes de

los riesgos de enfermedades agudas y crónicas derivadas de la contaminación del aire. No obstante, los valores establecidos en las Directrices deberían ser el objetivo final (WHO, 2018).

2.6. La exposición personal a PM_{2.5}

La exposición personal es el contacto de un agente químico, físico o biológico, con los límites exteriores de un organismo a una concentración determinada y durante un intervalo de tiempo (INECC, 2016). Las mediciones de la exposición personal a contaminantes en el aire, son por lo general, mediciones en las que el ser humano es entendido como un receptor de la contaminación ambiental (INECC, 2016) y pueden realizarse de las siguientes maneras:

1. La frecuencia y duración que la persona pasa en diferentes microambientes.
2. La tasa ventilatoria de la persona, que es determinada por el tipo de actividad que realiza (dormir, caminar, hacer ejercicio intenso, etcétera).
3. La concentración de contaminantes presente en cada uno de estos microambientes.

Estudios acerca de la exposición personal a PM_{2.5} se han realizado en diferentes ciudades a lo largo del mundo (Tabla 3). La finalidad de estos es estudiar las concentraciones de contaminantes a que se encuentran expuestas las personas cuando salen de sus hogares y se disponen a realizar un trayecto sea cual sea su medio de transporte, ya que se sabe que en función del transporte que se use se tienen diferentes exposiciones a PM_{2.5}. Por ejemplo, en Santa Mónica, California EUA (Quiros et al., 2013) evaluaron las concentraciones de PM_{2.5} en 2011 con un sistema multimodal simultáneo de tres medios de transporte: caminando, en bicicleta, auto con ventanas abiertas y cerradas; en tres horarios diferentes a lo largo del día, sin buscar coincidir con la hora pico. Su estudio que las concentraciones medidas en la tarde y noche eran hasta 70 % más bajas comparadas con las de la mañana, además de que cuando se conduce con las ventanas cerradas la concentración a la que se expone reduce un 60 %. Así mismo, expusieron que de

acuerdo con el estándar anual nacional de calidad del aire ambiental (que establece un valor de $15 \mu\text{g m}^{-3}$), las mediciones realizadas conduciendo con las ventanas abiertas eran el doble del estándar anual, en bicicleta 15 veces el estándar y hasta 30 veces caminando.

En Europa Okokon et al. (2017) realizaron un estudio multimodal semi-simultáneo (midiendo dos transportes al mismo tiempo) para medir la concentración de partículas superfinas y la exposición a ruido en Helsinki en Finlandia, Rotterdam en Países Bajos y Thessaloniki en Grecia en 2011 en bicicleta, autobús y automóvil. Las concentraciones promedio de exposición fueron de 84, 72, 94 y $69 \mu\text{g m}^{-3}$ para bicicleta, autobús y, automóvil cerrado y automóvil abierto, respectivamente. Ellos concluyeron que los usuarios que utilizan transporte activo y público tienen mayor riesgo de exposición a contaminación en comparación con los vehículos de uso privado. Por otro lado, Hertel et al. (2008) en Copenhague, Dinamarca mostró que la exposición a contaminantes aéreos (entre ellos $\text{PM}_{2.5}$) puede reducirse significativamente si se selecciona la ruta apropiada sin importar el medio de transporte, considerando solo bicicleta y autobús.

En la Ciudad de México, Hernández-Paniagua et al. (2018) realizaron un estudio de transporte multimodal de la exposición personal a $\text{PM}_{2.5}$ en horas no pico de tráfico en medios activos (caminando y bicicleta) y motorizados (autobús, automóvil y automóvil eléctrico). El modo de transporte en que determinaron la menor exposición a $\text{PM}_{2.5}$ fue caminar (promedio $16.5 \mu\text{g m}^{-3}$) y la mayor en bicicleta (promedio $81.7 \mu\text{g m}^{-3}$), mientras que la inhalación fue menor en automóviles privados que en transporte público a diésel.

Estos estudios remarcan la necesidad de contar con mayor información sobre cuales son los medios de transporte que someten a mayor exposición a $\text{PM}_{2.5}$ a la población cuando realiza sus traslados cotidianos. Esta información puede servir a las autoridades en la toma de decisiones orientadas a mitigar la exposición poblacional y por ende, la salud pública.

Tabla 3. Estudios existentes sobre exposición a PM_{2.5} para medios de transporte multimodal alrededor del mundo.

No.	Autor artículo	Ciudad/Estado	País	Hora pico	Transporte	Simultaneo	Año medición
1	Quiros et al, 2013	Santa Monica, California	EUA	No		Si	2011
2	Okokon et al, 2017	Helsinki	Finlandia	No		Semi	2011
3	Okokon et al, 2017	Rotterdam	Países Bajos	No		Semi	2011
4	Okokon et al, 2017	Thessaloniki	Grecia	No		Semi	2011
5	McNabola et al, 2008	Dublin	Irlanda	Si		Semi	2005-2006
6	Informe INECC 2005	Ciudad de México	México	Si		No	2004
7	Hertel et al, 2008	Copenhague	Dinamarca	Si		Si	2005
8	Hernández et al, 2018	Ciudad de México	México	No		Semi	2014
9	Chaney et al, 2017	Salt Lake, Utah	EUA	Si		Si	2016
10	Adams et al, 2001	Londres	Reino Unido	Si		Si	1999-2000


Caminando


Bicicleta


Automovil


Autobús


Tren ligero


Tren subterráneo


Auto eléctrico


Metrobús

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo General

Medición de concentraciones de $PM_{2.5}$ en diferentes medios de transporte en dos avenidas típicas de la Ciudad de México mediante el empleo de muestreadores activos personales para determinar los niveles de exposición.

3.2. Objetivos Particulares

- Elaboración y desarrollo del diseño experimental
- Selección y descripción de equipo de monitoreo
- Determinar la exposición personal a $PM_{2.5}$ en diferentes modos de transporte sobre las avenidas Miguel Ángel de Quevedo y Revolución.
- Identificar las zonas donde existe la mayor exposición a $PM_{2.5}$.
- Identificar los horarios en los que se presenta una mayor exposición a $PM_{2.5}$.
- Comparar las tasas de inhalación de $PM_{2.5}$ en los diferentes medios de transporte seleccionados.

4. METODOLOGÍA

4.1. Diseño experimental

Se realizaron muestreos para medir las concentraciones de PM_{2.5} para estimar la exposición personal en modos de transporte que circulan sobre dos avenidas principales de la CDMX: Av. MAQ y Av. REV en el periodo Febrero-Marzo 2020 y Noviembre-Diciembre 2021. Los medios de transporte seleccionados fueron trolebús, autobús, scooter eléctrico (solo en la primera campaña de muestreo), automóvil, bicicleta y caminando. A continuación, se presenta en la Tabla 4 el calendario de los muestreos realizados durante el presente trabajo.

Tabla 4. Calendario de las campañas de muestreo realizadas.

Transportes	Fecha de muestreo	Avenida
	25 de febrero 2020	MAQ
	2 de marzo 2020	MAQ
	4 de marzo 2020	MAQ
	6 de marzo 2020	MAQ
	29 de noviembre 2021	MAQ
	1 de diciembre 2021	MAQ

	3 de diciembre 2021	REV
	6 de diciembre 2021	REV
	8 de diciembre 2021	REV
	10 de diciembre 2021	REV
	14 de diciembre 2021	REV
	16 de diciembre 2021	REV



Los muestreos se realizaron en dos horarios diferentes para comparar los cambios en la exposición personal a PM_{2.5}, en los horarios donde existe mayor tráfico y transporte de la población en las avenidas estudiadas, por lo que se escogió en la mañana entre las 08:00-10:00 CDT y en las tardes a las 18:00-21:00 hrs. en trayectos de ida y vuelta.

El protocolo para realizar la medición fue el siguiente:

- Se calibraron los equipos de medición personal Thermo modelo pDR-1500 antes del primer muestreo para conocer el flujo de aire al que debe estar programado cada uno de ellos para verificar los flujos de operación a 1.52 L min⁻¹ siguiendo el manual de operación del instrumento de medición.

- En el punto de partida, los equipos se co-colocaron durante 5 minutos con la finalidad de tener un periodo de tiempo en el cual se tenían mismas condiciones para la corrección de lecturas por diferencias en la operación de los equipos.
- En cada medio de transporte se anotó en una bitácora hora en la que se partió del sitio de inicio, hora de llegada, matrícula de autobús, número de trolebús, incidencias reportadas en el camino como obras de construcción, vehículos que liberen contaminantes en exceso o cualquier otra anomalía que se considere afectaría la medición habitual. Esto con la finalidad de tener información de campo durante el tratamiento de datos.
- Se activaron los GPS del celular con la aplicación MyTracks para comenzar a documentar el viaje.
- Al llegar al punto de encuentro, se anotó la hora de llegada y se detuvo la medición de todos los equipos.
- Al regresar al Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático (ICCAyCC), se descargaron los datos obtenidos de todos los equipos (Anexo I). Se quitaron las pilas a los equipos y se cargaron.
- Con los datos de exposición a $PM_{2.5}$ obtenidos, se elaboraron gráficas de distribución de los niveles de $PM_{2.5}$ en cada transporte, así como su comparación en los dos horarios utilizados.

4.2. Descripción de la zona de estudio

El proyecto se desarrolló en dos avenidas principales al sur de la ZMVM, esto con el fin de monitorear los perfiles de la distribución espacial en estas zonas con diferentes medios de transporte que transitan sobre ellas. Las avenidas de estudio se acortaron a una distancia de recorrido de aproximadamente 4 km cada una.

4.2.1. Av. Miguel Ángel de Quevedo

La Av. MAQ se encuentra al Sur de la CDMX, en donde se interseca con la estación Miguel Ángel de Quevedo de la Línea 3 del Sistema de Transporte Colectivo Metro (Fig. 3). Se encuentra en el límite de las demarcaciones de la alcaldía Álvaro

Obregón y Coyoacán, cerca de esta avenida se encuentran diferentes negocios como joyerías, tiendas, supermercados, teatros, entre otros.

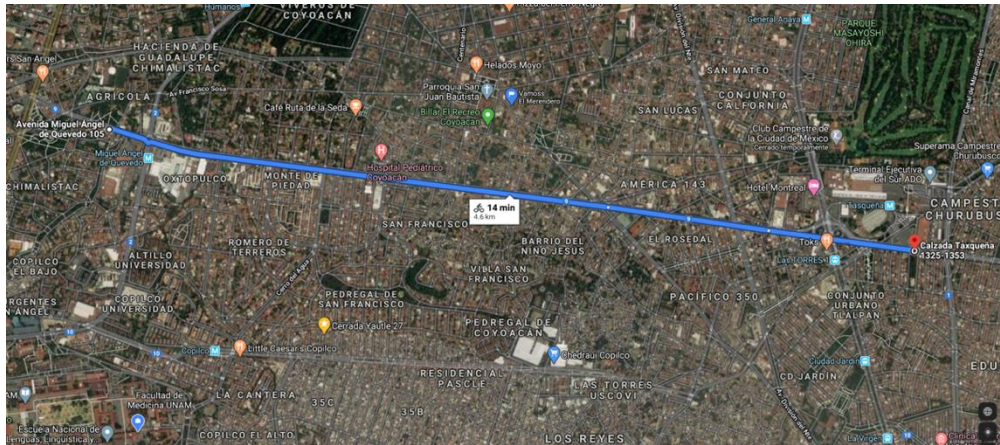


Figura 3. Ruta de medición sobre la Av. MAQ. Recuperada de Google Maps (2022).

El punto de partida fue frente la plaza comercial Punto MAQ, la cual se encuentra a un costado de Calzada de Tlalpan, siguiendo hasta Librerías Gandhi cruzando Av. Universidad. A continuación, se describen los tipos de transporte utilizados en esta campaña:

➤ **Autobús.**

La línea RUTA 1 de autobús (Fig. 4) (Metro Taxqueña) tiene 20 paradas desde Dr. Gálvez hasta Metro Taxqueña - Canal de Miramontes. Comienza a operar a las 5:00 y finaliza a las 23:57.



Figura 4. Fotografía de autobús Ruta 1. Recuperado de Google (2022).

➤ Trolebús

La Línea 7 anteriormente conocida como Línea K del trolebús de la CDMX, recorre la ciudad de oriente a poniente, sobre Avenida Tláhuac, calzada Taxqueña, Avenida MAQ, Avenida Universidad, Avenida Copilco y Avenida Insurgentes Sur (Fig. 5) (STE, 2022).



Figura 5. Fotografía de trolebús Yutong. Recuperada de Google (2022).

➤ Automóvil

Se utilizó un automóvil City de la marca Honda para las campañas de muestreo (Fig. 6).



Figura 6. Fotografía de automóvil City 2018. Recuperada de Google (2022).

➤ Scooter eléctrico

Se utilizó un Scooter eléctrico de la marca Xiaomi para las campañas de muestreo (Fig. 7).



Figura 7. Fotografía de scooter eléctrico marca Xiaomi. Recuperada de Google (2022).

➤ Bicicleta

Se utilizó una bicicleta convencional para las campañas de muestreo (Fig. 8).



Figura 8. Fotografía de bicicleta utilizada durante el muestreo.

4.2.2. Av. Revolución

La Av. Revolución (REV) va de norte a sur y forma parte de una vialidad más grande conocida como Circuito Interior Bicentenario. Esta vialidad cruza por tres alcaldías, Álvaro Obregón, Benito Juárez y Miguel Hidalgo. La Figura 9 muestra la sección de la avenida Revolución en la cual se realizaron las mediciones.

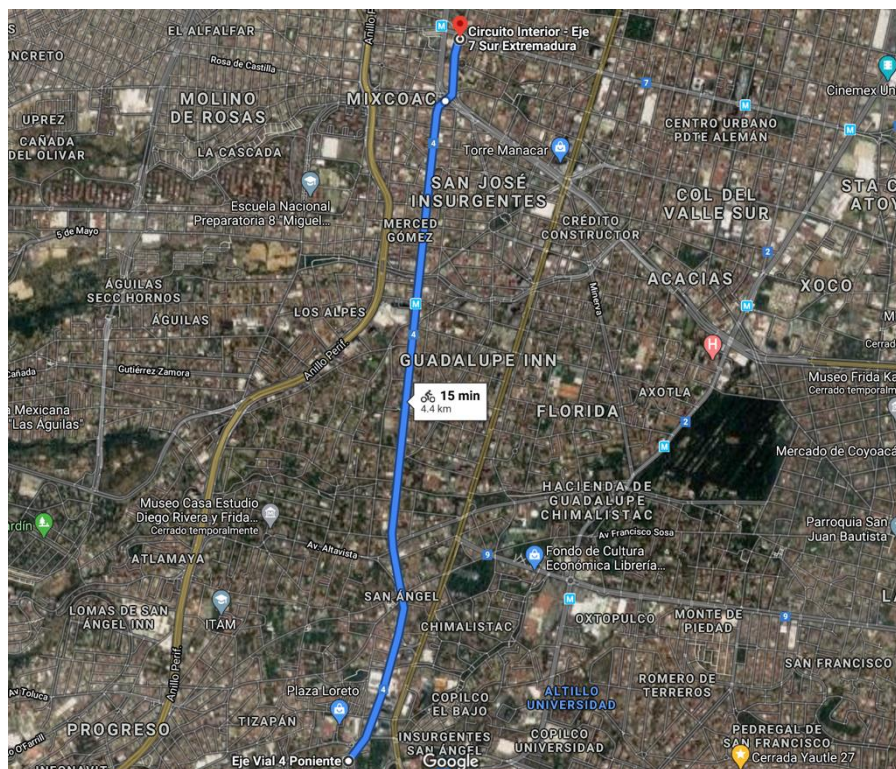


Figura 9. Ruta medición sobre la Av. Revolución-Patriotismo en la CDMX.
Recuperada de Google Maps (2022).

El punto de inicio se localiza en la parada de camiones entre Av. REV y Eje 10 Sur, hasta la parada que se encuentra en Av. Patriotismo y Eje 7 sur. A continuación, se mencionan los medios de transporte utilizados:

➤ Autobús

La línea COREVSA tiene paradas desde San Ángel hasta Chapultepec (Fig. 10).



Figura 10. Fotografía de autobús COREVSA de Av. REV. Recuperada de Google (2022).

➤ Automóvil

Se utilizó el mismo automóvil de la campaña de Av. MAQ (Fig. 6).

➤ Bicicleta

Se utiliza la misma bicicleta de la campaña de Av. MAQ (Fig. 9).

4.3. Campañas de muestreo

4.3.1. Instrumentación

Para la realización de las campañas de muestreo se llevó a cabo un previo manejo de los equipos para familiarizarse con los mismos. A continuación, se presenta describen los mismos.

- pDR-1500 Thermo: Monitor personal que funciona por nefelometría empleado para obtener mediciones en tiempo real de la concentración de material particulado menor a $2.5 \mu\text{m}$ (Fig. 11).



Figura 11. Fotografía de instrumento pDR-1500 utilizado para monitorear PM_{2.5} en los transportes seleccionados en la CDMX.

- GPSmap 60CSx: Sistema de posicionamiento global, que determina la localización registrando datos de longitud, latitud y altitud cada segundo (Fig. 12). Se usó para la realización de mapas de distribución de concentración de PM_{2.5}, acoplando las coordenadas obtenidas por el GPS con los datos de concentración de PM_{2.5} obtenidos con el pDR.



Figura 12. Fotografía de instrumento Garmin GPS utilizada.

- microAeth AE51: Dispositivo de medición en tiempo real de la exposición personal a carbono negro (Fig. 13). Mide la tasa de cambio en la absorción de la luz transmitida debido a la recolección continua de aerosol en el filtro. Medición a 880nm interpretada como concentración de carbono negro (SIAFA, 2019).



Figura 13. Fotografía de instrumento microAeth. Recuperada de Google (2022).

- GRIMM 11-C: Espectrómetro portátil de aerosoles, que muestra simultáneamente tres valores de PM (PM_{10} , $PM_{2.5}$ y PM_1) en tiempo real (Fig. 14). La concentración de PM se determina en el rango de 0.25 a $32\ \mu m$ de diámetro.



Figura 14. Fotografía de instrumento Grimm. Recuperada de Google (2022).

- Langan T15z: Medidor de concentraciones de CO en ppm y temperatura.

4.3.2. Calibración de los monitores personales de $PM_{2.5}$

Calibración del equipo pDR-1500.

1. Definir tres diferentes flujos en LPM y tres diferentes intervalos de tiempos en minutos.
2. Conectar una manguera desde un gasómetro hasta el ciclón correspondiente del pDR.
3. Encender el pDR con el botón de encendido/apagado.
4. Seleccionar en la pantalla "Configure", después buscar la opción de "Flow rate" para establecer el flujo en LPM.
5. Presionar "ESC" hasta la pantalla principal, seleccionar "Operate" y buscar la opción "Start a Run".
6. Registrar el volumen inicial del gasómetro y comenzar a medir el tiempo.

7. Anotar el flujo observado en cada intervalo de tiempo hasta obtener los cinco datos.
8. Al terminar, parar la corrida con el botón “ESC” y repetir en los diferentes tiempos y flujos establecidos.
9. En una hoja de Excel anotar los datos obtenidos:
 - ◆ Se hace la diferencia del volumen inicial con el volumen obtenido a cada tiempo.
 - ◆ Se divide la diferencia del volumen entre el tiempo.
 - ◆ El flujo obtenido se multiplica por un factor de corrección de 0.80455137 (este valor se encuentra en el manual del equipo).
 - ◆ Se calcula un promedio del flujo en ese intervalo de tiempo.
 - ◆ Esto se hace en todas las corridas.
10. Se realiza una interpolación con los flujos reales calculados para obtener el flujo que se desea.

5. RESULTADOS

5.1. Exposición personal a PM_{2.5} en Av. MAQ

Para realizar el análisis de la información obtenida para la Av. MAQ, en primera instancia se optó por realizar un histograma de los medios de transporte utilizados, con la finalidad de condensar y mostrar de mejor forma los datos pertinentes a las rutas realizadas en la avenida. La Figura 15 compara los datos de exposición a PM_{2.5} en los medios de transporte utilizados mediante histogramas, encontrando una gran variedad en la distribución de estos. De forma evidente por parte, dentro del autobús dada su amplitud en valores de concentración se observa una mayor concentración de PM_{2.5} en comparación con los demás medios. Esto puede ser explicado ya que en el autobús existe un mayor intercambio del aire contaminado de las emisiones más cercanas como puede ser las mismas emisiones de los autobuses que entran a la cabina (Guervara-Luna et al., 2020). También es el medio que ofrece menor protección a la infiltración de emisiones al microambiente interno, debido a que la libre circulación del aire pues en la totalidad de los viajes realizados las ventanillas de los autobuses muestreados se encontraron abiertas.

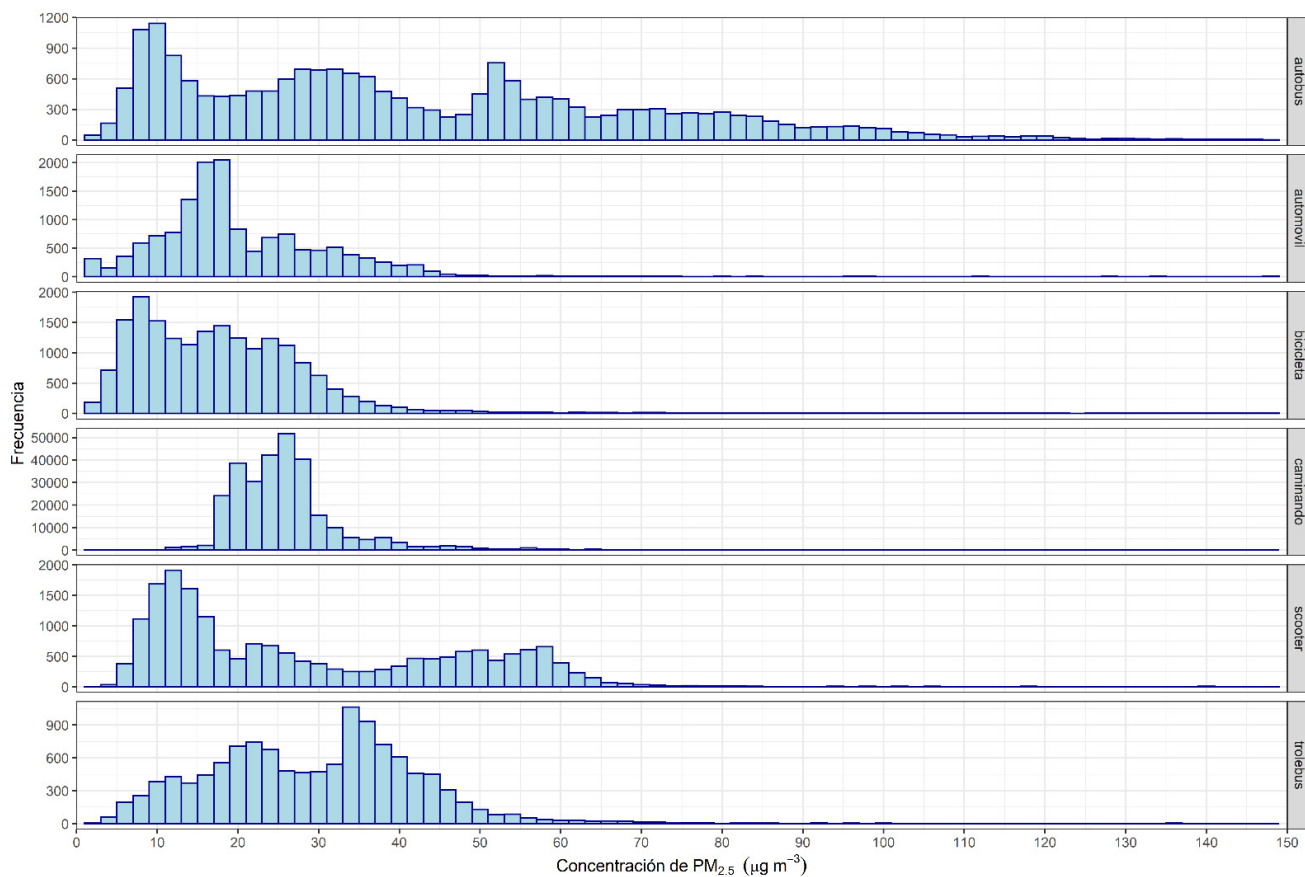


Figura 15. Histograma de concentraciones de PM_{2.5} medidas en los medios de transporte utilizados en la Av. MAQ.

El transporte motorizado con mayor frecuencia de bajas concentraciones es el automóvil (Fig.15). Dentro de los medios de transporte activos, se encontró una similitud en los valores de exposición experimentados en el scooter y la bicicleta. Los histogramas de estos muestran de manera evidente una alta frecuencia de bajas concentraciones de PM_{2.5}, que es explicable según las notas de bitácora y características de la zona de estudio porque estos transportes circulan no directamente inmersos en el arroyo vehicular. Esta separación permite que existe una dispersión de las emisiones salientes de los tubos de escape de vehículos automotores previo al contacto con los usuarios de transportes activos. Además, en las rutas donde existe un carril exclusivo para su traslado, que si bien no está lo suficientemente apartado, hay una mayor dispersión de emisiones siendo esto un

factor relevante en la disminución de las concentraciones de exposición (Hertel et al., 2008).

El transporte activo con menores concentraciones de exposición es caminando, basado en la alta frecuencia de datos medidos. Lo anterior derivado debido a que la zona peatonal se encuentra más alejada de la vialidad que los demás medios activos considerados en este estudio. Además, debido a la distancia existente entre los peatones y las fuentes directas de emisión (Hernández-Paniagua et al., 2018), no se experimentan picos de concentración de $PM_{2.5}$ resultando en la menor variabilidad de concentraciones entre todos los transportes estudiados.

5.1.1. Comparación entre medios activos y móviles

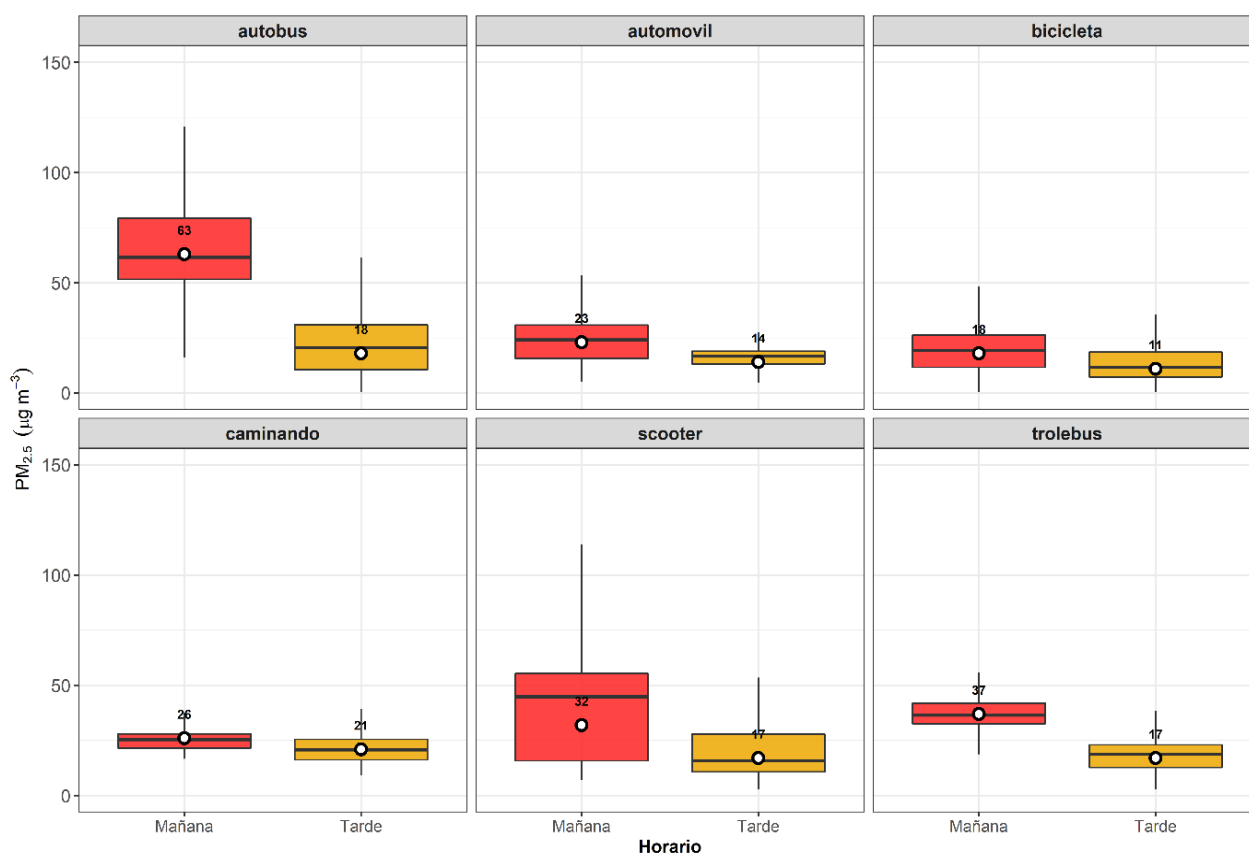


Figura 16. Gráfica de caja y bigotes que muestra la comparación de las concentraciones de $PM_{2.5}$ medidas dentro de los medios activos y motorizados en la Av. MAQ. Los puntos blancos corresponden a los promedios.

Se realizó un gráfico de caja y bigotes para identificar la distribución de las concentraciones observadas de PM_{2.5} en los muestreos realizados en todos los medios de transporte sobre la Av. MAQ (Fig. 16). En primer lugar, se puede hacer una comparación entre los dos horarios estudiados, en donde existe una clara diferencia en el horario de la mañana que muestra las mayores concentraciones de PM_{2.5}. El autobús fue en el medio de transporte que mostró las mayores concentraciones con un promedio de 83 $\mu\text{g m}^{-3}$ durante el trayecto de la mañana y 18 $\mu\text{g m}^{-3}$ durante el trayecto de la tarde. Esto es debido a que este microambiente de transporte es el que es más susceptible al ingreso de emisiones debido a que circula con ventanas abiertas, además de poder sufrir procesos de autocontaminación (Guevara-Luna et al., 2020). El siguiente transporte con las mayores concentraciones en su interior es el trolebús, las cuales fueron muy parecidas a las medidas en el scooter eléctrico, con un promedio de 37 y 17 $\mu\text{g m}^{-3}$ en la mañana y tarde, respectivamente. El scooter mostró en el horario de la mañana un promedio de 32 $\mu\text{g m}^{-3}$. Es posible observar que las concentraciones de exposición en el scooter muestran una mayor amplitud en la distribución de datos debido a que no se tiene un carril exclusivo para su circulación por lo que está expuesto de forma más directa a las emisiones provenientes de automotores.

Para el medio de transporte activo caminando se midieron bajas concentraciones de exposición llegando hasta los 26 $\mu\text{g m}^{-3}$ en promedio en la mañana y a los 21 $\mu\text{g m}^{-3}$ en la tarde. De forma general, se encontró que no existe una clara diferencia en la exposición a PM_{2.5} en los horarios monitoreados, lo que puede ser explicado por un impacto no significativo de las emisiones vehiculares sobre la exposición de los peatones debido a la distancia existente acera-arroyo vehicular. Por último, los medios de transporte con menores concentraciones de exposición fueron el automóvil con promedios de 23 y 21 $\mu\text{g m}^{-3}$ y en la bicicleta con 16 y 11 $\mu\text{g m}^{-3}$, en la mañana y tarde, respectivamente.

5.1.2. Mapas

Los mapas que a continuación se presentan, muestran la comparación de las concentraciones medidas de PM_{2.5} sobre la Av. MAQ en automóvil, autobús y

trolebús, utilizados durante el recorrido descrito en la sección e Metodología. Se realizó una normalización utilizando el promedio de las concentraciones de $PM_{2.5}$ con la finalidad de poder comparar las mediciones realizadas en dos diferentes años y temporadas: invierno de 2020 previo a la ocurrencia de la pandemia de COVID-19 y otoño de 202 durante la pandemia de COVID-19. La normalización se realizó dividiendo cada una de las mediciones de 1-s obtenidas durante los recorridos realizados entre el promedio respectivo de cada viaje y transporte (los cuales pueden ser observados en cada una de las gráficas).

Los mapas realizados presentan de forma unificada los viajes en un solo recorrido por ruta para las diferentes fechas de medición. De esta forma se puede realizar una mejor comparación con respecto al trayecto. Es importante recalcar el hecho de que la imagen satelital presentada de fondo en cada mapa se hizo coincidir de manera tal que los gráficos anexados contiguos presenten la misma escala espacial y de valores medidos. Esto permite realizar una mejor interpretación de los resultados obtenidos.

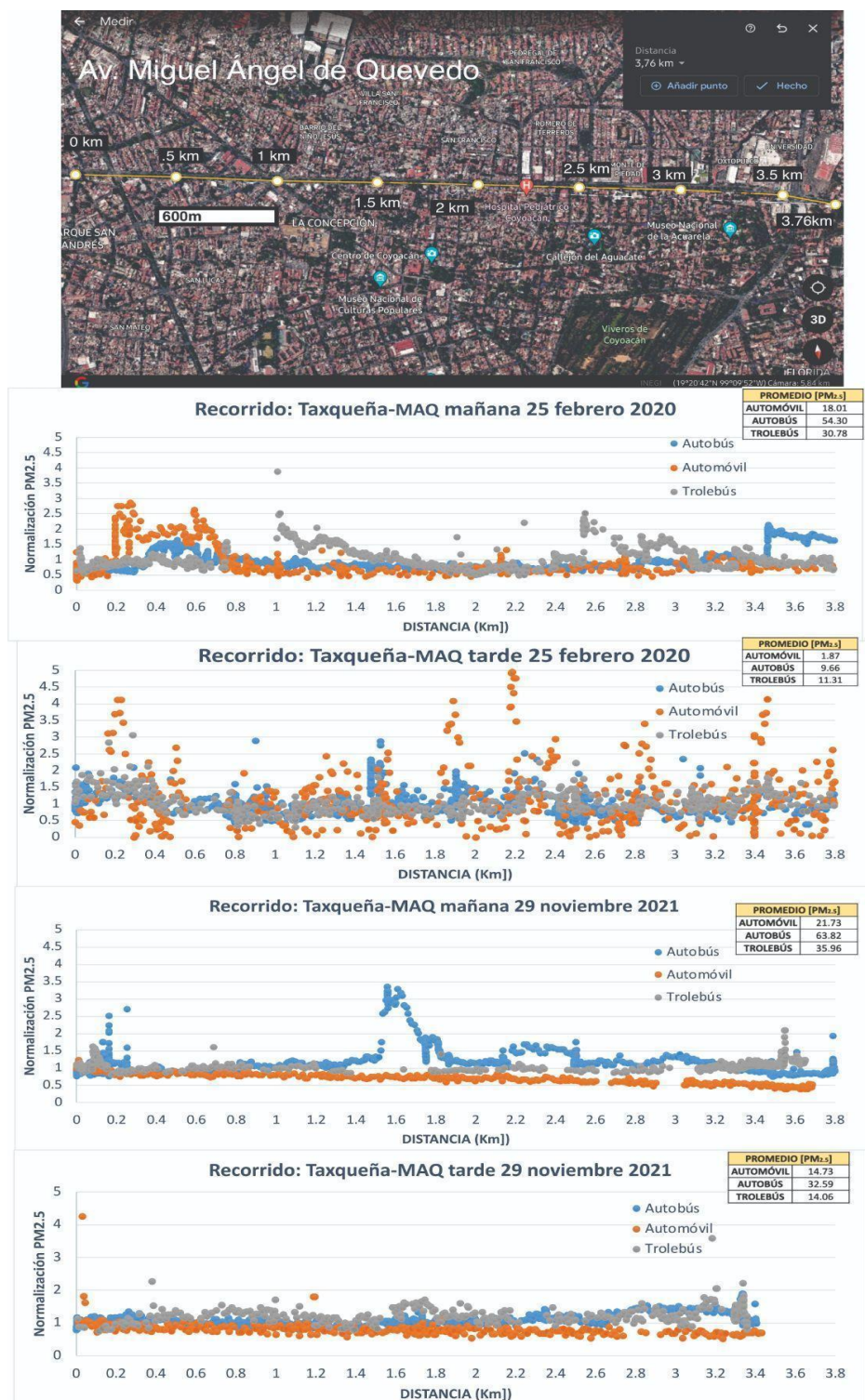


Figura 17. Comparación de la exposición a PM_{2.5} en automóvil, autobús y trolebús realizados en la ruta Taxqueña a MAQ el 25 de febrero del 2020 y 29 de noviembre del 2021 en horarios de mañana y tarde. La distancia de 0 km corresponde a la glorieta de MAQ y el final del recorrido es en la Terminal de Taxqueña.

La primera comparación presenta los niveles medidos de $PM_{2.5}$ durante el periodo de pre-pandemia y durante pandemia (fig. 17), en la cual se observa que tanto en el horario de la mañana como en el de la tarde del 2020, los valores normalizados de $PM_{2.5}$ son mayores a los del 2021. Estos menores niveles de $PM_{2.5}$ pueden ser explicados probablemente por menores emisiones de forma general, ya que durante el mes de noviembre del 2021 en la CDMX aún se encontraban en vigencia algunas restricciones de actividades no esenciales (Ortega, 2021).

Al realizar la comparación de las concentraciones de $PM_{2.5}$ medidas en el horario de la mañana y tarde de 2020 y 2021, es notorio que en ambos años el horario de tránsito con mayor impacto sobre la exposición a $PM_{2.5}$ es el horario de la mañana. Una posible explicación a este fenómeno es que, aunque en ambos horarios se realizó el monitoreo durante las horas pico de tráfico, en el horario de la mañana fue registrada una mayor afluencia de vehículos automotores sobre la vialidad de estudio.

Los promedios de concentraciones de $PM_{2.5}$ calculados por transporte se muestran en la esquina superior derecha de la Figura 17 y pueden servir como un indicador de exposición en la ruta de estudio. El transporte de menor valor normalizado de $PM_{2.5}$ fue el automóvil en todas las rutas de TAX-MAQ de la mañana y tarde de ambos años. Esto explicable debido a que el microambiente del automóvil tiene condiciones particulares, ya que el recorrido se realizaba con ventanas cerradas. Por lo tanto, la exposición a $PM_{2.5}$ fue impactada en menor medida por emisiones directas principalmente de camiones a diésel (Wu et al., 2013), en comparación con los otros transportes que circular en el arroyo vehicular.

La Figura 17 muestra eventos particulares de exposición debido a las variaciones espaciales, como en el recorrido de TAX-MAQ de la mañana del 29 de noviembre 2021 en el que en el kilómetro 1.6 para el autobús se aprecia un incremento considerable en los valores normalizados. Dicho incremento se presenta de forma continua pero los valores son menores y pueden ser explicados por trabajos de mantenimiento de jardines y de camellón lo que ocasionó un incremento en la resuspensión de partículas.

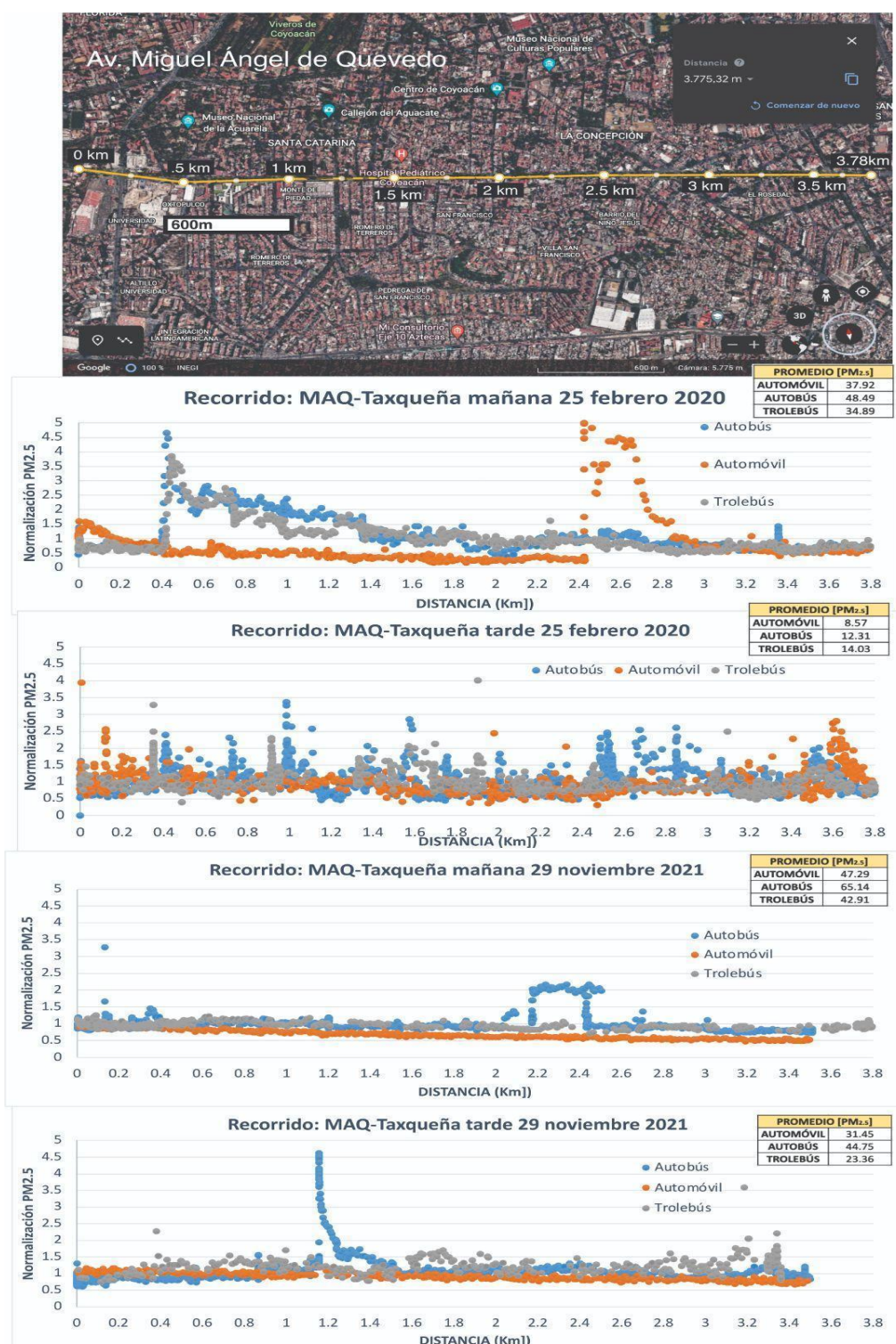


Figura 18. Comparación de la exposición a PM_{2.5} en automóvil, autobús y trolébus realizados en la ruta MAQ a Taxqueña el 25 de febrero del 2020 y 29 de noviembre del 2021 en horarios de mañana y tarde. La distancia de 0 km corresponde a la Terminal de Taxqueña y el final del recorrido a la glorieta de MAQ.

La Figura 18 muestra la comparación de valores de exposición $PM_{2.5}$ normalizados sobre la Av. MAQ para automóvil, autobús y trolebús. En las mediciones realizadas en 2020 previo a la pandemia por COVID-19 se observaron mayores picos de exposición y dispersión de concentraciones, con picos marcados en las intersecciones con avenidas principales. También durante 2020 y 2021 el horario mostró mayores valores normalizados en comparación con los valores de la tarde, probablemente debido a que en horario de la tarde se observó un menor flujo de vehículos que en la mañana. En la Av. MAQ el horario cuando se observó el mayor número de vehículos fue de 07:00 a 8:00 hrs. local.

El automóvil mostró de forma general los menores valores normalizados de $PM_{2.5}$ de en comparación con todos los transportes comparados. Esto fue debido a que durante el viaje se mantuvieron las ventanas cerradas durante todo el trayecto por lo que el microambiente fue menos afectado por plumas de emisión de $PM_{2.5}$ que el autobús y trolebús. Por ejemplo, la medición del 25 de febrero de 2020 en la mañana se observó un pico alto de concentración en un recorrido de alrededor de 400 m, el cual puede ser asociado a que en el trayecto de medición se circuló detrás de un camión a diésel del cual sus emisiones afectaron tal microambiente. Por último, en el viaje en autobús del 29 de noviembre de 2021 en la tarde, se observó un pico de concentración significativo en el kilómetro 1.2, el cual fue causado por el paso de un camión a diésel influyendo sobre las concentraciones de $PM_{2.5}$ que llegaron hasta valores de $200 \mu g m^{-3}$. Se ha observado que circular al lado de fuentes de significativas de emisiones de $PM_{2.5}$, principalmente automotores a diésel, pueden influenciar de forma marcada las concentraciones de exposición dentro de las cabinas de automotores (Panchal et al., 2022), lo que coincide con el comportamiento observado en este trabajo.

5.2. Exposición personal a PM_{2.5} en Av. REV

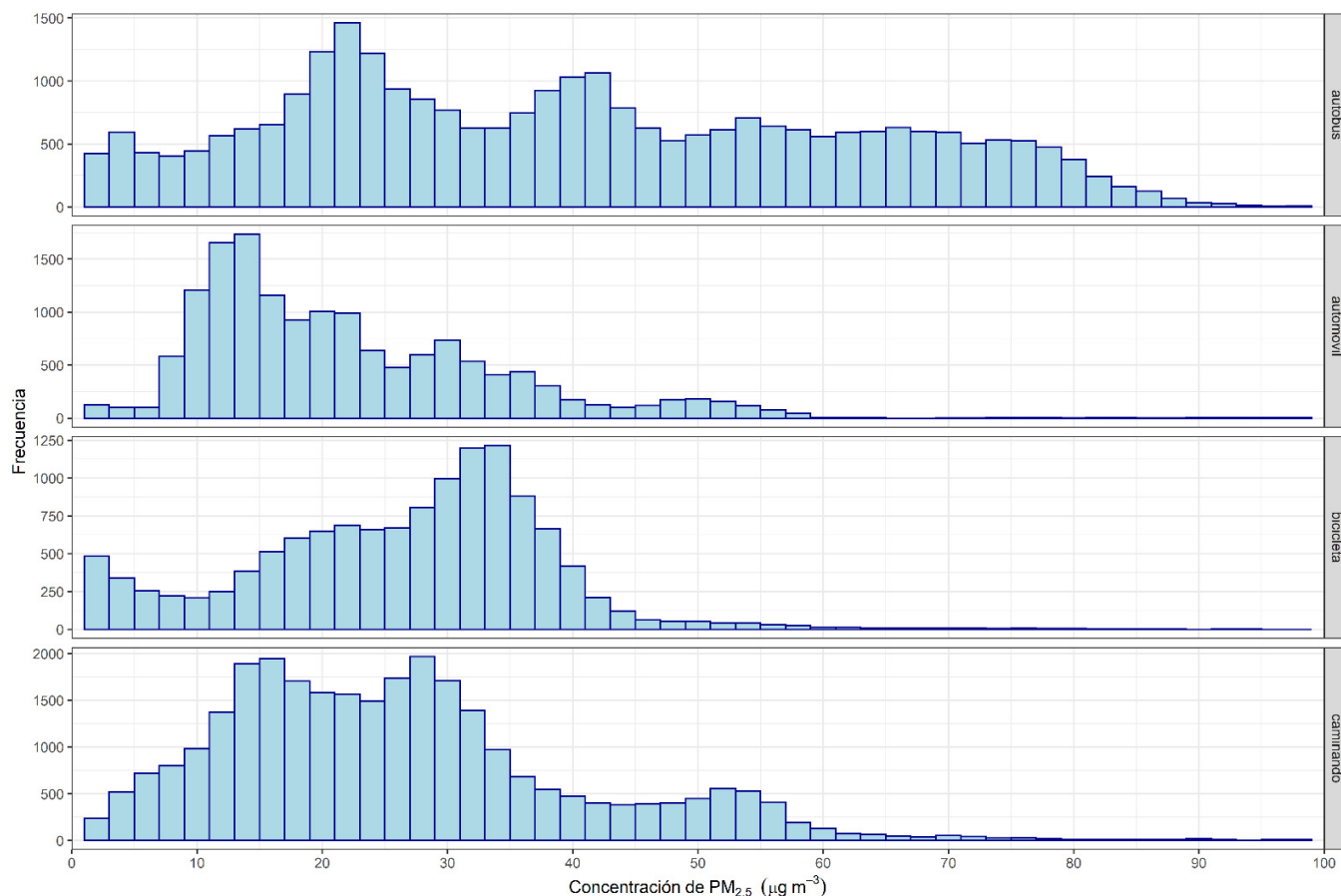


Figura 19. Histograma de concentraciones de exposición a PM_{2.5} medidas en los medios de transporte motorizados y activos monitoreados en la Av. REV de la CDMX.

La Figura 19 muestra el histograma de datos obtenidos de concentración de PM_{2.5} para los diferentes transportes estudiados sobre la Av. REV de la CDMX. Al igual que para la Av. MAQ, se estudiaron transportes motorizados y activos. Para el transporte activo caminando, se registraron mayores frecuencias de bajas concentraciones (<25 µg m⁻³), de forma similar a las concentraciones determinadas sobre la avenida MAQ. Al igual que para dicha avenida, la predominancia de bajas concentraciones de PM_{2.5} es explicada por la separación de la zona peatonal con la el arroyo vehicular donde se generan emisiones significativas de contaminantes.

La distribución de concentraciones de PM_{2.5} medidas en autobús sobre la Av. REV fue más amplia (5–100 µg m⁻³) que en el resto de los transportes evaluados tanto

motorizados como activos ($<80 \mu\text{g m}^{-3}$), mientras que las concentraciones en automóvil mostraron una distribución similar pero menor amplitud (Figura 19). En el caso de la bicicleta y caminando, las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ exhibieron comportamientos similares, aunque la bicicleta mostró ligeramente mayores concentraciones (en el rango $>60 \mu\text{g m}^{-3}$) aunque con menores frecuencias debido a que el recorrido realizado fue de menor duración.

5.2.1. Comparación entre medios activos y móviles

La Figura 20 muestra la comparación de exposición a $\text{PM}_{2.5}$ en medios activos y motorizados durante la campaña de muestreo sobre Av. REV. El mayor promedio de exposición entre los cuatro medios de transporte estudiados, se registró en autobús en ambos horarios con un valor de $35 \mu\text{g m}^{-3}$ en el trayecto de la mañana y de $28 \mu\text{g m}^{-3}$ en el trayecto de la tarde. En automóvil, las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ fueron ligeramente menores que en autobús, con promedios de $28 \mu\text{g m}^{-3}$ y $21 \mu\text{g m}^{-3}$ mañana y tarde, respectivamente. Los medios de transporte activos bicicleta y caminando mostraron promedios similares entre ellos para cada horario de $28\text{--}32 \mu\text{g m}^{-3}$ y $19\text{--}24 \mu\text{g m}^{-3}$ en los horarios de mañana y tarde, respectivamente.

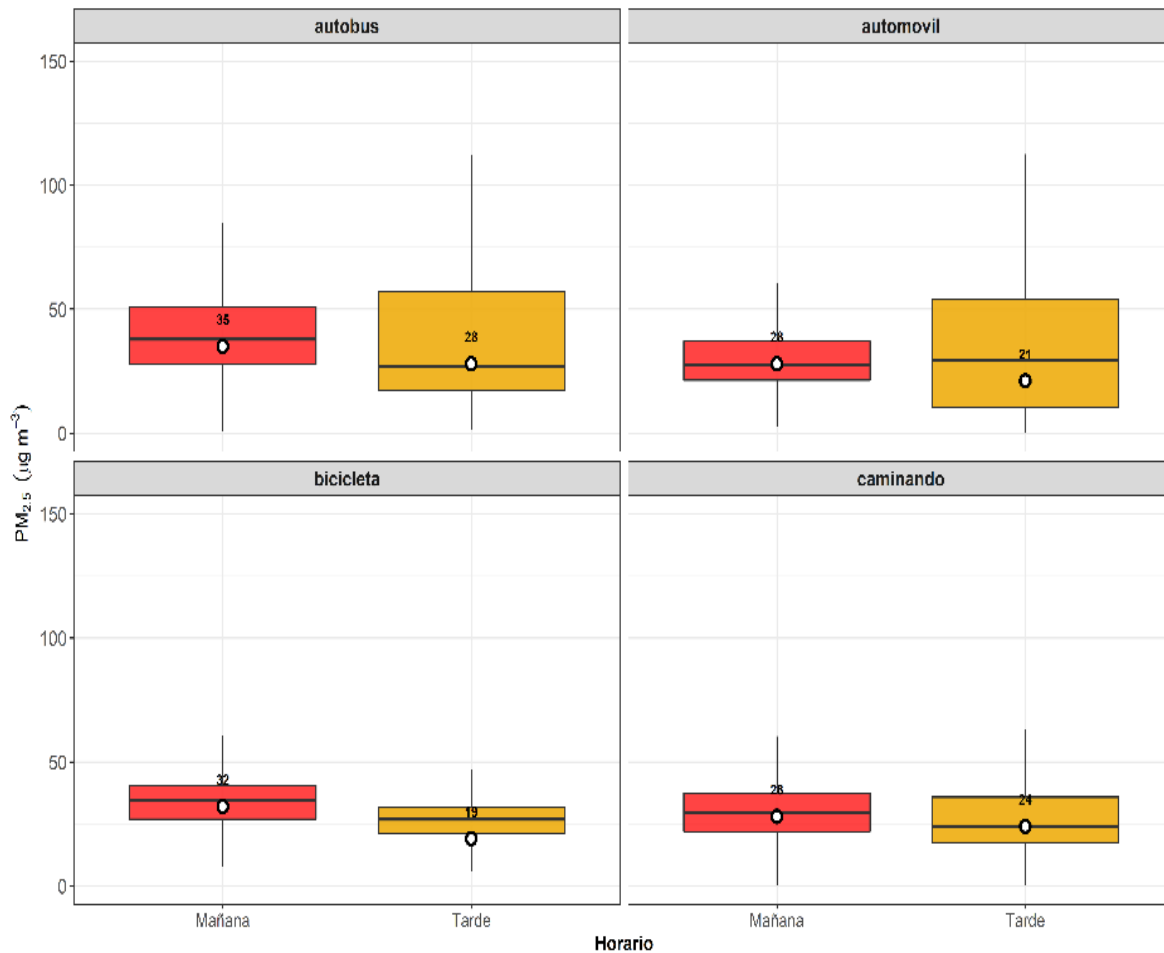


Figura 20. Gráfica de caja y bigotes que muestra la comparación de la exposición a $PM_{2.5}$ en cuatro diferentes medios de transporte que circulan sobre la Av. REV en la CDMX.

5.2.2. Mapas

Las mediciones sobre la Av. REV que fueron comparadas en el presente trabajo corresponden a los días 12 de marzo del 2020 (mañana) y el 8 de diciembre del 2021 (mañana y tarde) para los transportes: automóvil y autobús (Fig. 21). Las concentraciones normalizadas medidas en 2021 mostraron menos variabilidad que las medidas en 2020. De hecho, en el caso del automóvil las concentraciones de $PM_{2.5}$ disminuyen hasta niveles cercanos a cero al final de la ruta muestreada, a pesar de haber sido obtenidas con condiciones similares a las de los muestreos comparados. De forma clara, las concentraciones medidas en autobús mostraron poca variabilidad en 2021 en comparación con 2020. Este comportamiento es muy

probablemente explicado por un menor tráfico y menores niveles ambientales de $PM_{2.5}$ en 2021 en comparación con los correspondientes de 2020 debido a las medidas de distanciamiento social aun aplicables. De hecho, la disminución de concentraciones fue evidente en ambos horarios muestreados.

El automóvil mostró picos de concentración de $PM_{2.5}$ en las zonas donde la permanencia al lado de camiones a diésel tuvo influencia sobre la exposición de los usuarios, a pesar de circular con las ventanas cerradas. Estos picos de concentración no fueron registrados en el autobús a pesar de mostrar tiempos de recorrido mayores que en el automóvil.

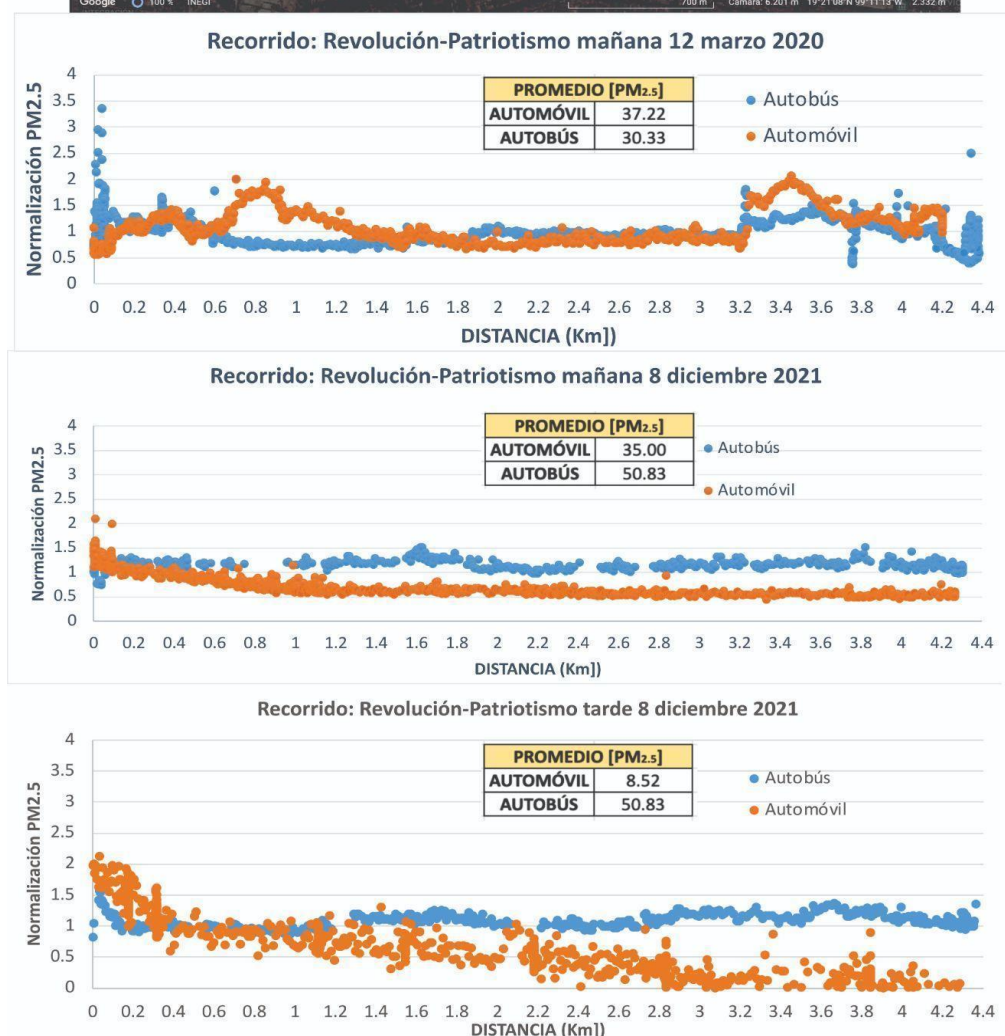
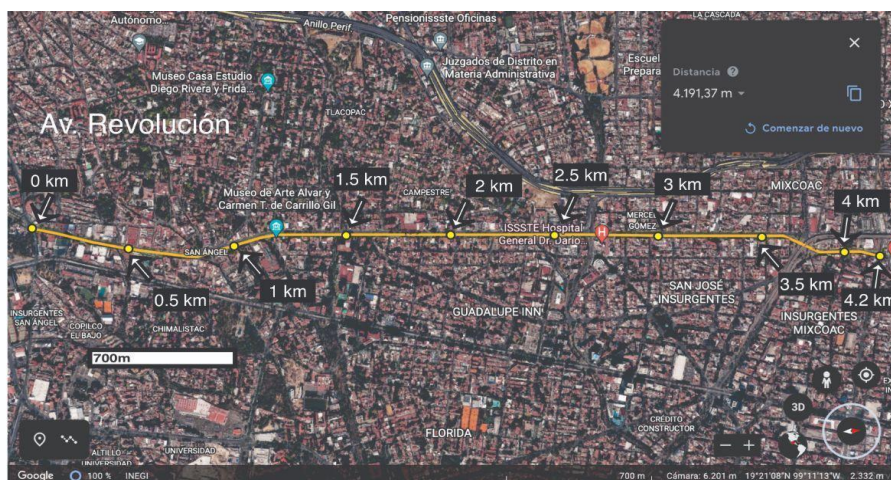


Figura 21. Comparación de la exposición a PM_{2.5} en autobús y automóvil realizados en la ruta REV-Patriotismo el 12 de marzo del 2020 y 8 de diciembre del 2021 en horarios de mañana y tarde. La distancia de 0 km corresponde a la parada de autobuses en Revolución con esquina Eje 10 y el final del recorrido es en Patriotismo con esquina en Eje 7 Sur.

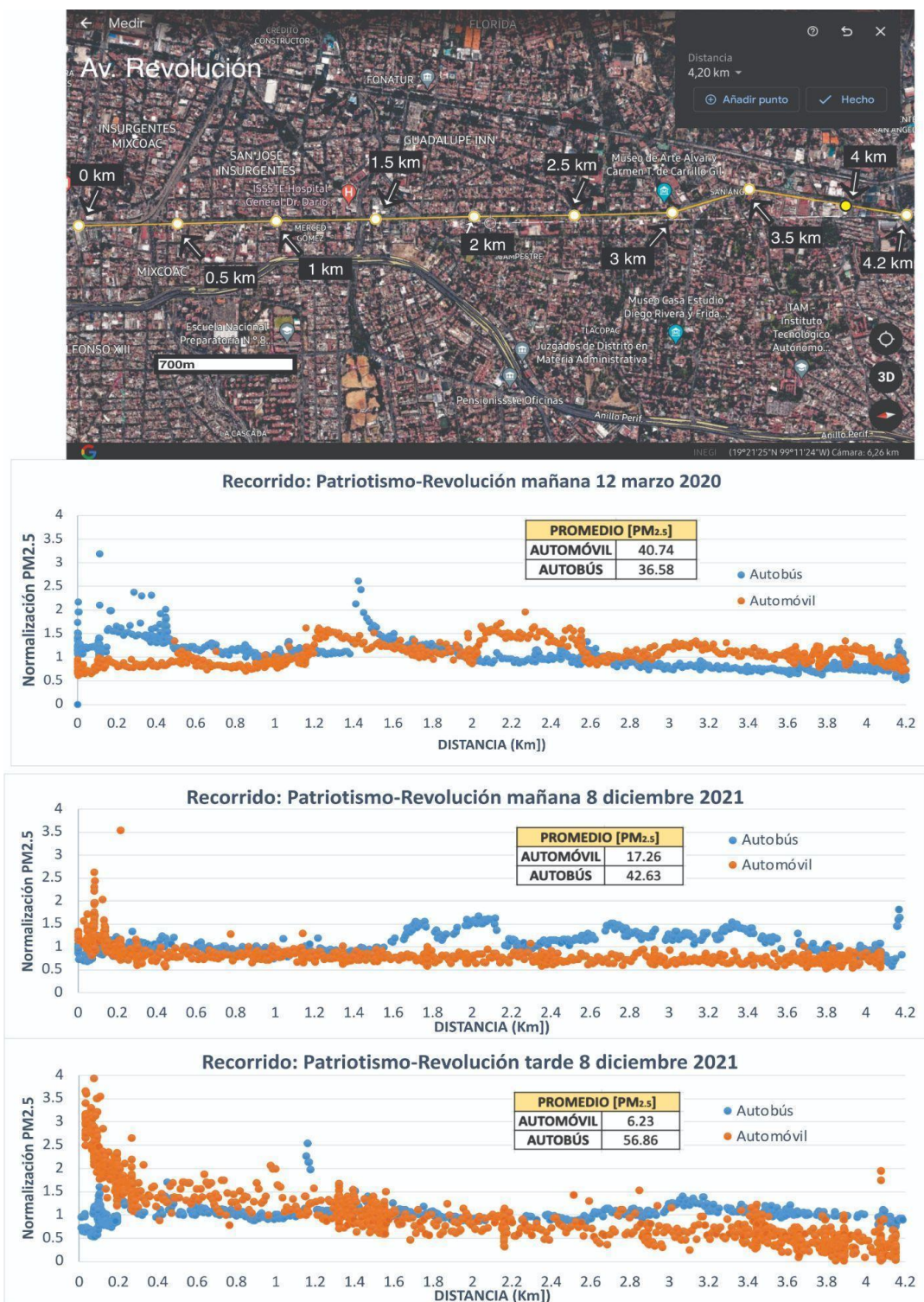


Figura 22. Comparación de la exposición a PM_{2.5} en autobús y automóvil realizados en la ruta Patriotismo-REV el 12 de marzo del 2020 y 8 de diciembre del 2021 en horarios de mañana y tarde. La distancia de 0 km corresponde a Patriotismo con esquina en Eje 7 Sur y el final del recorrido es en la parada de autobuses en Revolución con esquina Eje 10.

La Figura 22 muestra la comparación de las concentraciones de $PM_{2.5}$ normalizadas medidas sobre la ruta de PAT-REV para los años 2020 y 2021. Durante la mañana del 12 de marzo de 2020, tanto el automóvil como el autobús mostraron valores normalizados mayores a los de 2021, sin embargo, los promedios calculados para cada viaje muestran que el autobús exhibió un mayor promedio en la mañana y tarde del 2021 debido a la influencia de picos de concentración a partir de la mitad del viaje. Estos picos coinciden con el incremento de la cantidad de vehículos que se incorporan a la vialidad lo que puede explicar los picos observados. De igual manera, en 2020 los valores normalizados fueron mayores que en la mañana del 8 de diciembre del 2021. Esto es atribuible a que, en 2021, durante la fecha de medición se comenzaban a retomar las actividades normales después del confinamiento por COVID-19, por lo que la cantidad de vehículos presentes y emisiones potenciales fueron presumiblemente menores que en 2020. Aunque no se recolectaron datos que permitan comparar las concentraciones de $PM_{2.5}$ durante la tarde del 12 de marzo de 2020 con el 8 de diciembre de 2021, la comparación de horarios muestra valores normalizados mayores al promedio ($1.5 \mu g m^{-3}$) similares en el autobús debido probablemente a la influencia de las ventanas abiertas durante el trayecto en 2020.

Además, es posible observar en la medición de la mañana del 12 de marzo de 2020 (Fig. 22) altos valores normalizados en el autobús en los primeros metros desde el punto de partida de ruta. Esto es debido a que dicho punto es una base de camiones a diésel, típicamente más de 10 en el horario medido que en espera de pasaje y tienen impacto sobre las concentraciones de $PM_{2.5}$ medidas. Después se observó en el kilómetro 1.4 otro pico de concentración, que de acuerdo a las anotaciones realizadas es debido a que el camión utilizado se mantuvo por un periodo de tiempo considerable (>1 min) en el semáforo al cruce con la Av. Barranca del Muerto.

Finalmente, el 8 de diciembre de 2021, en los dos horarios estudiados se observaron las mayores concentraciones en automóvil en los primeros 200 metros, esto debido a que la zona de inicio de la ruta de medición es de alto tránsito de

camiones a diésel y vehículos en general, además que solo existe un carril por lo que el tiempo de residencia en la zona y en cercanía a potenciales fuentes de emisión es significativo.

5.3. Comparación de la exposición personal a PM_{2.5} durante el cambio de Trolebús entre 2020 y 2021.

En el año 2020 cuando comenzó el muestreo en la Av. MAQ se realizaron mediciones de PM_{2.5} en Trolebús los cuales fueron sustituidos por modelos más recientes durante los muestreos de 2021. La línea 7 anteriormente conocida como K1 que recorre la ciudad de oriente a poniente, sobre avenida Tláhuac, Calzada Taxqueña, Av. MAQ, Avenida Universidad, Avenida Copilco y Avenida de los Insurgentes Sur, es la ruta que se seleccionó para el estudio, la cual para antes del año 2020 operaba con trolebuses modelo Masa Somex series 4000 con capacidad de hasta 40 pasajeros (Fig. 23). En agosto de 2020 estos vehículos fueron actualizados por Trolebuses denominados “Cero emisiones” Yutong modelo ZK5120C - 2020 con capacidad de hasta 85 pasajeros (Fig. 24). Aunque los modelos de Trolebús Yutong están equipados con sistemas de recirculación de aire con filtro, durante todas las mediciones realizadas los recorridos se realizaron con ventanas abiertas. Esto a que es requerimiento para el transporte público operar con ventanas abiertas para evitar ventilar los microambientes internos durante la pandemia por COVID-19 como medida enfocada en minimizar los contagios de la población.

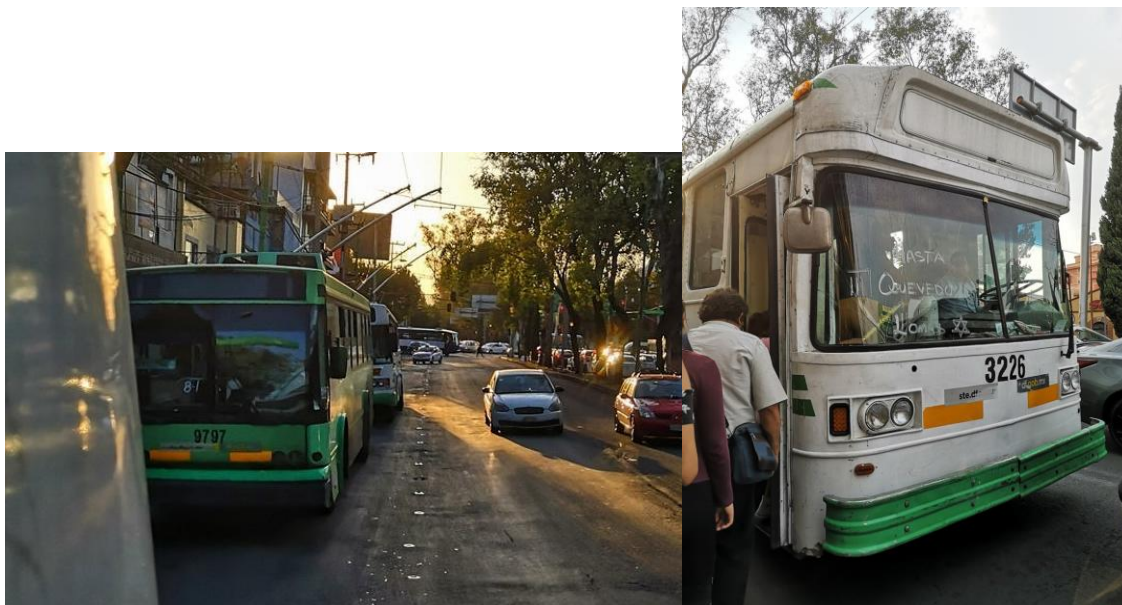


Figura 23. Fotografías de trolebús MASA Somex 4000 monitoreados en el año 2020 para determina la exposición de los usuarios a PM_{2.5}.



Figura 24. Fotografías de trolebús modelo YUTONG en los cuales se realizaron las mediciones de exposición a PM_{2.5} durante 2021.

5.3.1. Mapas

La Figura 25 muestra la comparación de las mediciones de exposición a PM_{2.5} realizadas en los modelos descritos de Trolebús previamente en la ruta Taxqueña-MAQ. En ambas mediciones, los promedios medidos fueron mayores en 2021 tanto en la mañana ($35.9 \mu\text{g m}^{-3}$) como en la tarde ($14 \mu\text{g m}^{-3}$), con diferencias similares de entre $3\text{--}5 \mu\text{g m}^{-3}$. Para las mediciones en la mañana, las variaciones más significativas ocurrieron en el km 1 y 2.6, donde se observa un aumento en los

valores normalizados seguidos de un decaimiento gradual, por lo cual es presumible que circuló al lado del trolebús una fuente significativa de $PM_{2.5}$ las cuales entraron a la cabina debido a que este operaba con ventanas abiertas. Durante el recorrido de la tarde, no se observaron diferencias marcadas entre ambos periodos de muestreos. Es evidente que el horario de transporte tuvo un papel significativo sobre las concentraciones de exposición a $PM_{2.5}$ medidas ya que en ambos años las mayores concentraciones fueron medidas en el horario de la mañana.

La Figura 26 muestra la comparación de las mediciones de exposición a $PM_{2.5}$ en Trolebús en la ruta de MAQ-Taxqueña en 2020 y 2021. Durante el horario de la mañana en 2020 se identificaron zonas con picos de exposición los cuales no fueron observados en 2021 donde se observó un comportamiento mayormente lineal. Por ejemplo, del kilómetro 0.4 al 1 se registró una zona con altos valores de exposición, que de acuerdo a los registros realizados durante la medición corresponden con acciones de mantenimiento y construcción en la entrada de la plaza una comercial ubicada en el kilómetro 0.5 del recorrido. En el horario de la tarde, se observa de forma general valores normalizados de exposición similares en ambos periodos de medición. Es de resaltar que, en la medición de 2020, existen claros incrementos en el kilómetro 0.3, 0.9, 1.3, 19.9 y 2.6 los que son probablemente debido a paradas prolongadas del Trolebús en el que se realizaron las mediciones, lo que resultó en un incremento del contacto con fuentes potenciales de emisiones de $PM_{2.5}$.

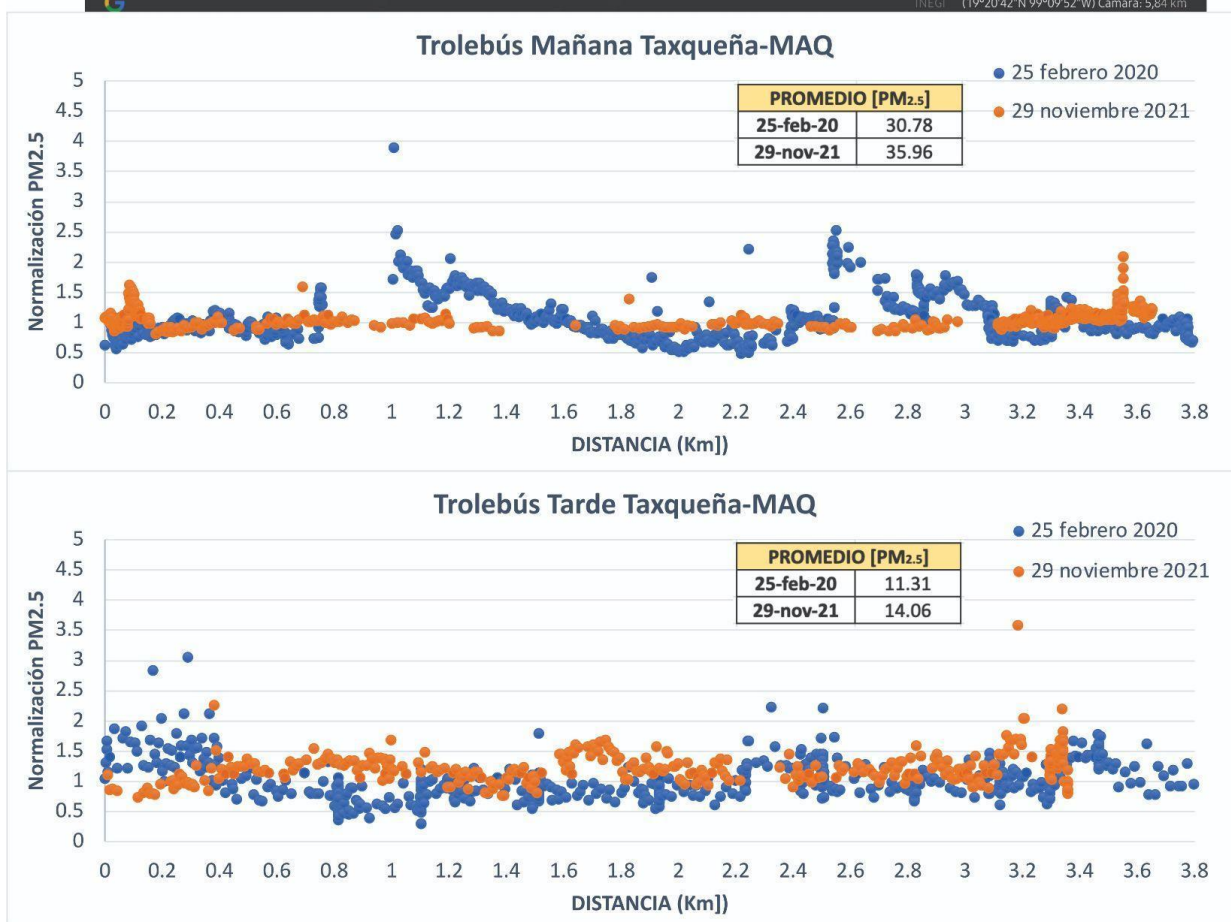


Figura 25. Comparación de las concentraciones de exposición a PM_{2.5} medidas durante recorridos en Trolebús realizados en 2020 y 2021 en la ruta Taxqueña-MAQ.

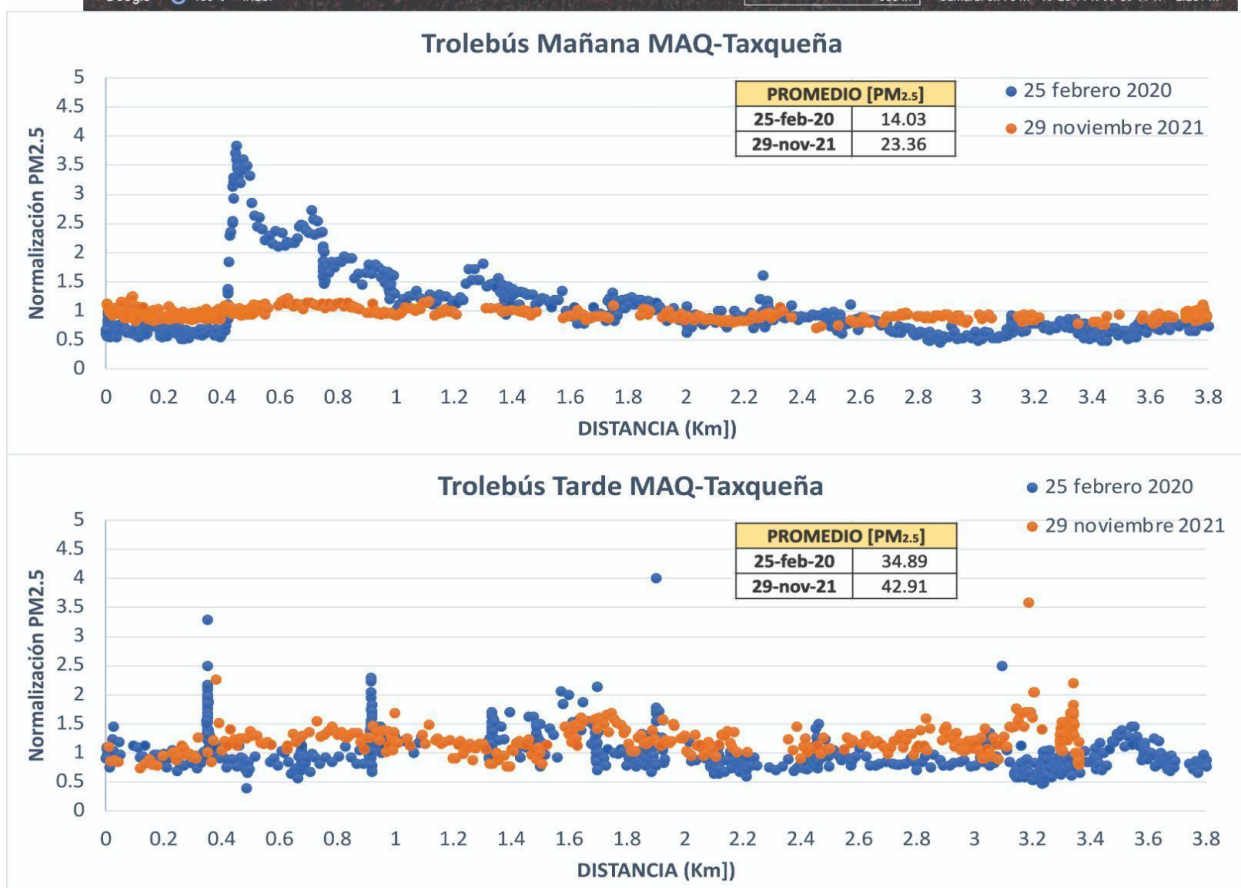


Figura 26. Comparación de las concentraciones de exposición a PM_{2.5} medidas durante recorridos en Trolebús realizados en 2020 y 2021 en la ruta MAQ-Taxqueña.

5.4.Exposición e inhalación en diferentes medios de transporte

Para la determinación de la exposición e inhalación se tomó como referencia el estudio de Hernández-Paniagua et al.(2018) en el que estimaron las inhalaciones que un usuario puede tener en promedio en cada transporte considerando las ventanas de exposición a las que se encuentra sometido el usuario y la actividad física que se realiza en el transporte seleccionado.

Tabla 5. Parámetros de respiración para estimar la inhalación de PM_{2.5} en diferentes medios de transporte. Información recuperada de Hernández-Paniagua et al. (2018)

Modo de transporte	Duración de la respiración (s)	Respiraciones en un minuto	Volumen inhalado (L/min)	Volumen inhalado (m ³ /min)	Volumen por respiración (m ³)
Autobús	[4,5]	13	11.4	0.0114	0.000877
Trolebús	[4,5]	13	11.4	0.0114	0.000877
Automóvil	[4,5]	15	14.3	0.0143	0.000953
Caminando	[3,4]	18	18.3	0.0183	0.001017
Bicicleta	[1,2]	34	42.1	0.0421	0.001238
Scooter	[1,2]	34	42.1	0.0421	0.001238

Con esta información es posible calcular de manera más precisa la cantidad de material particulado inhalado en un recorrido dependiendo la actividad y transporte.

La inhalación personal de PM_{2.5} varía con respecto al transporte utilizado, ya sea por recorrido, velocidad, capacidad, modelo, ventilación, etc. La Tabla 6 y 7 muestran la exposición e inhalación integradas promedio de PM_{2.5} determinadas para los diferentes modos de transporte monitoreados sobre la Av. MAQ normalizadas con tiempo y distancia (en el ANEXO I se encuentra la memoria de cálculo de exposición). En ambos horarios, el transporte que mostró las mayores concentraciones integradas de exposición a PM_{2.5} por hora y por kilómetro fue el scooter (104,124 - 57,128 $\mu\text{g m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ y 16,252 - 6,807 $\mu\text{g m}^{-3} \text{ km}^{-1}$) sin embargo, cuando se analiza la exposición con las dos normalizaciones realizadas se observan ciertas discrepancias. Primeramente se tiene que el segundo transporte con mayor exposición por cada hora de recorrido en ambos horarios es la bicicleta (58,616 -

35,543 $\mu\text{g m}^{-3} \text{ h}^{-1}$) seguido del autobús en la mañana (54,757 $\mu\text{g m}^{-3} \text{ h}^{-1}$) pero en la tarde cambia, siendo caminando el que ocupa el tercer lugar (23,935 $\mu\text{g m}^{-3} \text{ h}^{-1}$), esto es debido a que durante la tarde existe una mayor congestión vehicular en algunos cruces de la avenida por lo que las personas que se encuentran caminando en las aceras se encuentran expuestos a los humos de los escapes de los autobuses y automóviles que se encuentran detenidos.

Cuando se observa el valor de exposición por cada kilómetro recorrido se tiene que en ambos horarios caminando ocupa el segundo lugar (11,441 - 5,946 $\mu\text{g m}^{-3} \text{ km}^{-1}$), seguido de la bicicleta (8,994 - 4,325 $\mu\text{g m}^{-3} \text{ km}^{-1}$). Es de resaltar que dependiendo de como se presenten los datos (por h o por km) es el orden de como los transportes se encuentran expuestos, es decir, aunque los medios móviles son los mayormente expuestos en comparación con los motorizados, la bicicleta tiene mayores valores por hora en comparación de sus kilómetros recorridos. En ambos casos el automóvil fue el que menores valores presenta (20,850-13,098 $\mu\text{g m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ y 2,648 - 1,490 $\mu\text{g m}^{-3} \text{ km}^{-1}$).

De forma similar a la exposición, la inhalación integrada promedio de $\text{PM}_{2.5}$ en los transportes evaluados sobre la Av. MAQ (en el ANEXO II se encuentra la memoria de cálculo de inhalación) fue mayor en ambos horarios para el scooter (128.8 - 71.1 $\mu\text{g h}^{-1}$ y 20.1 - 8.5 $\mu\text{g km}^{-1}$) y menor para el automóvil (20.8 - 11.6 $\mu\text{g h}^{-1}$ y 2.6 - 1.3 $\mu\text{g km}^{-1}$). Se observó que, el cálculo de inhalación para caminando por kilómetro (11.6 - 6.1 $\mu\text{g km}^{-1}$) fue mayor que la bicicleta (11.1 - 5.3 $\mu\text{g km}^{-1}$) debido a la actividad física que realizan los peatones cuando se trasladan. De forma general, se observa un comportamiento común en el que los medios de transporte sin cabina (scooter, bicicleta y caminando) son los que mostraron tanto mayor exposición como inhalación mientras que los que poseen cabina (automóvil, autobús y trolebús) protegen a los usuarios y resultan en menores exposiciones.

Tabla 6. Exposición e inhalación integrada promedio de PM_{2.5} en los diferentes modos de transporte monitoreados sobre la Av. MAQ. normalizado con el tiempo de recorrido.

Transporte	Tiempo recorrido Mañana (h)	Tiempo recorrido Tarde (h)	Exposición (µg/m³h)			Inhalación (µg/h)		
			Mañana		Tarde	Mañana		Tarde
Bicicleta	0.58	0.46	58616 ± 27624	35543 ± 16748	72.4 ± 34.5	43.5 ± 21.7		
Autobús	0.44	0.51	54757 ± 8600	18275 ± 2861	47.7 ± 6.8	15.7 ± 2.0		
Automóvil	0.48	0.43	20850 ± 3269	13098 ± 2058	20.8 ± 2.1	11.6 ± 2.3		
Scooter	0.59	0.45	104124 ± 32114	57178 ± 26944	128.8 ± 61.0	71.1 ± 33.3		
Trolebús	0.525	0.496	28594 ± 4501	14381 ± 2256	24.8 ± 3.8	12.1 ± 2.0		
Caminando	0.858	0.939	50406 ± 10167	23935 ± 4834	51.3 ± 10.5	24.5 ± 5.3		

Tabla 7. Exposición e inhalación integrada promedio de PM_{2.5} en los diferentes modos de transporte monitoreados sobre la Av. MAQ. normalizado con la distancia.

Transporte	Tiempo recorrido Mañana (h)	Tiempo recorrido Tarde (h)	Exposición (µg/m³km)				Inhalación (µg/km)			
			Mañana		Tarde		Mañana		Tarde	
Bicicleta	0.58	0.46	8994	± 4239	4325	± 2038	11.1	± 5.3	5.3	± 2.6
Autobús	0.44	0.51	6374	± 1001	2466	± 386	5.6	± 0.8	2.1	± 0.3
Automóvil	0.48	0.43	2648	± 415	1490	± 234	2.6	± 0.3	1.3	± 0.3
Scooter	0.59	0.45	16252	± 5012	6807	± 3208	20.1	± 9.5	8.5	± 4.0
Trolebús	0.525	0.496	3971	± 625	1887	± 296	3.4	± 0.5	1.6	± 0.3
Caminando	0.858	0.939	11441	± 2308	5946	± 1201	11.6	± 2.4	6.1	± 1.3

Al igual que para la Av. MAQ, se realizó el cálculo de la exposición e inhalación integrada de PM_{2.5} para los medios de transporte evaluados sobre la Av. Revolución, mismos que se muestran en la Tabla 8 y 9, normalizadas por hora y distancia respectivamente. La bicicleta fue el transporte que mayor exposición integrada a PM_{2.5} mostró (83,520 - 62,215 $\mu\text{g m}^{-3} \text{h}^{-1}$ y 14,119 - 8,740 $\mu\text{g m}^{-3} \text{km}^{-1}$) en concordancia con el comportamiento observado sobre la Av. MAQ por hora de recorrido. Sin embargo, sobre la Av. REV no se realizaron mediciones en scooter debido a limitaciones técnicas, por lo cual no fue posible reportar dicho transporte. Para los medios motorizados, el automóvil fue el transporte que mostró la menor exposición integrada en ambos horarios (22,782 - 18,198 $\mu\text{g m}^{-3} \text{h}^{-1}$ y 3,689 - 2,860 $\mu\text{g m}^{-3} \text{km}^{-1}$), lo que refleja un microambiente parcialmente con mayor aislamiento de las emisiones sobre el atollo vial en comparación con el autobús que fue el

transporte con mayor exposición (33,908 - 33,021 $\mu\text{g m}^{-3} \text{h}^{-1}$ y 5,732 - 6,368 $\mu\text{g m}^{-3} \text{h}^{-1}$).

Similarmente a la Av. MAQ, los valores presentados dependen de como se encuentren reportados, en segundo lugar de exposición por hora se encuentra el autobús (33,908 - 33,021 $\mu\text{g m}^{-3} \text{h}^{-1}$) pero si analizamos el valor por kilómetro recorrido nos encontramos que caminando se encuentra en segundo lugar (8,394 - 8,705 $\mu\text{g m}^{-3} \text{km}^{-1}$).

En la Av. REV. es de resaltar que aunque los tiempos de recorrido para la bicicleta fueron similares a los de los medios motorizados, la inhalación integrada (102.8–76.3 $\mu\text{g h}^{-1}$) fue significativamente mayor en promedio hasta 4.6 veces. Estos resultados revelan que los ciclistas inhalan considerablemente más $\text{PM}_{2.5}$ a pesar de ser un transporte que no contribuye con emisiones, y que la proximidad de las rutas existentes para ciclismo a los arroyos vehiculares debe ser considerada y de ser posible modificada como un esfuerzo de protección a su salud.

También es notable como al analizar los valores de inhalación por cada kilómetro recorrido, los medios móviles son los que mayor exposición en la avenida se tienen. Esto debido a que, como se mencionó anteriormente, los ciclistas y peatones se encuentran más expuestos a los contaminantes de los vehículos motorizados por la cercanía a ellos.

Tabla 8. Exposición e inhalación integrada promedio de $\text{PM}_{2.5}$ en los diferentes modos de transporte monitoreados sobre la Av. REV. normalizado con el tiempo de recorrido.

Transporte	Tiempo recorrido Mañana (h)	Tiempo recorrido Tarde (h)	Exposición ($\mu\text{g}/\text{m}^3\text{h}$)				Inhalación ($\mu\text{g}/\text{h}$)	
			Mañana		Tarde		Mañana	Tarde
Bicicleta	0.71	0.59	83520	± 39369	62215	± 29317	102.8 ± 49.3	76.3 ± 35.6
Autobús	0.71	0.81	33908	± 5307	33021	± 5186	29.6 ± 4.2	28.4 ± 4.9
Automóvil	0.68	0.66	22782	± 3574	18198	± 2847	22.1 ± 2.9	16.7 ± 3.0
Caminando	1.23	1.36	28663	± 5809	26882	± 5431	29.3 ± 5.7	27.2 ± 5.9

Tabla 9. Exposición e inhalación integrada promedio de PM_{2.5} en los diferentes modos de transporte monitoreados sobre la Av. REV. normalizado con la distancia.

Transporte	Tiempo recorrido Mañana (h)	Tiempo recorrido Tarde (h)	Exposición ($\mu\text{g}/\text{m}^3\text{km}$)						Inhalación ($\mu\text{g}/\text{km}$)					
			Mañana			Tarde			Mañana			Tarde		
Bicicleta	0.71	0.59	14119	±	6655	8740	±	4118	17.4	±	8.3	10.7	±	5.0
Autobús	0.71	0.81	5732	±	897	6368	±	1000	5.0	±	0.7	5.5	±	1.0
Automóvil	0.68	0.66	3689	±	579	2860	±	447	3.6	±	0.5	2.6	±	0.5
Caminando	1.23	1.36	8394	±	1701	8705	±	1759	8.6	±	1.7	8.8	±	1.9

6. DISCUSIÓN

6.1. Comparación entre avenidas

Se realizó una comparación de las concentraciones de exposición a $PM_{2.5}$ para medios comunes que circulan sobre las avenidas MAQ y REV utilizando promedios por horario de medición. La Tabla 7 muestra la comparación de las concentraciones de $PM_{2.5}$ medidas en automóvil y autobús en ambas rutas y horarios. En el caso del automóvil, las concentraciones de $PM_{2.5}$ mostraron el mismo comportamiento sobre las dos avenidas siendo mayores en el horario de la mañana y similares ($31\text{--}33\text{ }\mu\text{g m}^{-3}$) entre avenidas y menores en el horario de la tarde ($7\text{--}14\text{ }\mu\text{g m}^{-3}$) aunque con mayor variación que en el horario de la mañana. Esto es probablemente debido a que las mediciones dentro de los automóviles se realizaron con ventanas cerradas lo que protege la cabina del ingreso de plumas de emisión (Hernández-Paniagua et al., 2018).

Las concentraciones de $PM_{2.5}$ medidas en autobús mostraron diferente comportamiento entre ambas avenidas, mientras que en Av. MAQ fueron mayores en el horario de la mañana, sobre Av. REV fueron mayores en el horario de la tarde. Es probable que las mayores concentraciones registradas sobre Av. REV se deban a la presencia de abundante flujo vehicular de camiones a diésel, lo que se observó en los comportamientos individuales mediante la presencia de picos de exposición. De hecho, es notorio que sobre la Av. MAQ no existen bases de camiones de transporte público mientras que sobre la Av. REV existen los Centros de Transferencia Modal Mixcoac y Barranca del Muerto donde es muy probable que existan puntos de altas emisiones de $PM_{2.5}$ provenientes de camiones del transporte público, lo que explicaría la diferencia de concentraciones de $PM_{2.5}$ observadas (Tabla 10).

Tabla 10. Promedios de concentración de exposición a PM_{2.5} en $\mu\text{g m}^{-3}$ determinados por horario y tipos de transporte que circulan sobre las Avs. MAQ y REV.

Horario	MAQ		REV	
	Automóvil	Autobús	Automóvil	Autobús
Mañana	31	58	33	40
Tarde	14	25	7	54

6.2. Comparación con estudios previos en la CDMX

A la fecha solo existe un estudio sobre exposición a PM_{2.5} considerando diferentes modos de transporte sobre la Av. MAQ en la CDMX realizado por Hernández-Paniagua et al. (2018), por lo cual la comparación de los resultados de este trabajo con los presentados en tal estudio puede proveer información de la evolución temporal de la exposición en diferentes medios de transporte. Mientras que los resultados de Hernández-Paniagua et al. (2018) mostraron que la bicicleta fue el modo con la mayor exposición ($81 \mu\text{g m}^{-3}$), en el presente trabajo se observó que la bicicleta fue el modo con la menor exposición en ambos horarios ($11\text{--}18 \mu\text{g m}^{-3}$). También es de resaltar que en este trabajo la mayor exposición a PM_{2.5} correspondió al autobús con un promedio de global de $41 \mu\text{g m}^{-3}$, mientras que en el estudio mencionado el promedio fue de $49 \mu\text{g m}^{-3}$.

Para el modo de caminar, las exposiciones fueron relativamente similares entre el estudio previo de Hernández-Paniagua et al. (2018) ($19 \mu\text{g m}^{-3}$) y este estudio ($23 \mu\text{g m}^{-3}$). Finalmente, en este estudio se observaron menores concentraciones en el Trolebús ($14 \mu\text{g m}^{-3}$) que en el estudio de referencia. Es probable que las diferencias entre los patrones de exposición descritos previamente sean debidas al número de muestreos de ambos estudios, ya que mientras que en este estudio se realizaron al menos 5 muestreos para cada ruta y horario, en el estudio de Hernández-Paniagua et al. (2018) los resultados están basados en un solo día de muestreo. No obstante, los patrones espaciales de picos de exposición sí son coincidentes entre ambos estudios. Por ejemplo, se localizaron picos comunes de PM_{2.5} en la intersección de

Av. MAQ y División del Norte, al cruce con Av. Pacífico y con la calle Melchor Ocampo las cuales son probablemente debidas a picos de emisiones durante los ciclos de frenado y acelerado principalmente de automotores a diésel (Jazcilevich et al., 2015).

6.3. Normatividad y Riesgo

Los monitores personales mostraron el cambio en las concentraciones de $PM_{2.5}$ al encontrarse cerca de un transporte de diésel debido a los humos de escape emitidos por estos. Es importante mencionar la NOM-010-STPS-2014, que indica la concentración máxima a la que las personas deberían estar expuestas a estos humos en promedio de una jornada laboral con un valor de $2 \mu g m^{-3}$, dicho valor si bien no se puede comparar directamente con los resultados obtenidos en el presente proyecto, proporciona una idea general de las concentraciones a las que se puede estar expuestos durante un trayecto a las actividades diarias. De igual manera debe ser considerado entre las personas que manejan estos servicios dado que se encuentran expuestos a estos contaminantes durante su jornada laboral. También es de gran relevancia hacer mención que dentro de dicha norma se mencionan partículas insolubles o poco solubles con un valor máximo reportado de $10 \mu g m^{-3}$ de la fracción inhalada y de $3 \mu g m^{-3}$ para la fracción respirable, sin embargo, este proyecto está enfocado en las $PM_{2.5}$ de las cuales existe evidencia toxicológica de los efectos que tienen sobre la salud.

A nivel mundial, no existe a la fecha una norma o recomendación sobre los niveles de exposición personal a $PM_{2.5}$ en ningún tipo de microambiente. No obstante, la Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2021 considera los valores límite permisibles para la concentración de partículas suspendidas $PM_{2.5}$ en el aire ambiental y sus criterios para evaluación. Es por ello que para efectos de protección de la salud de la población más vulnerable se establecen los valores:

- Límite de 24 horas: $41 \mu g m^{-3}$, como promedio aritmético de 24 h.
- Límite anual: $10 \mu g m^{-3}$, como promedio aritmético anual.

Considerando dichos valores, la Fig. 27 muestra los promedios de concentraciones de cada transporte para en un aspecto amplio observar los límites permitidos y los existentes de cada día de muestreo. Es destacable que la exposición promedio a PM_{2.5} de los usuarios de todos los medios de transporte sobrepasaron la referencia del límite anual permisible. En el caso de la comparación con el promedio diario, se observa como el día 4 es donde mayor exposición existió por lo que el autobús, el automóvil y el scooter rebasaron el límite permitido. De igual manera el autobús rebasa este límite tres días más. Aunque tales valores no son directamente comparables, sugieren que la exposición a PM_{2.5} en microambientes de transporte debe ser atendida con miras a proteger la salud pública.

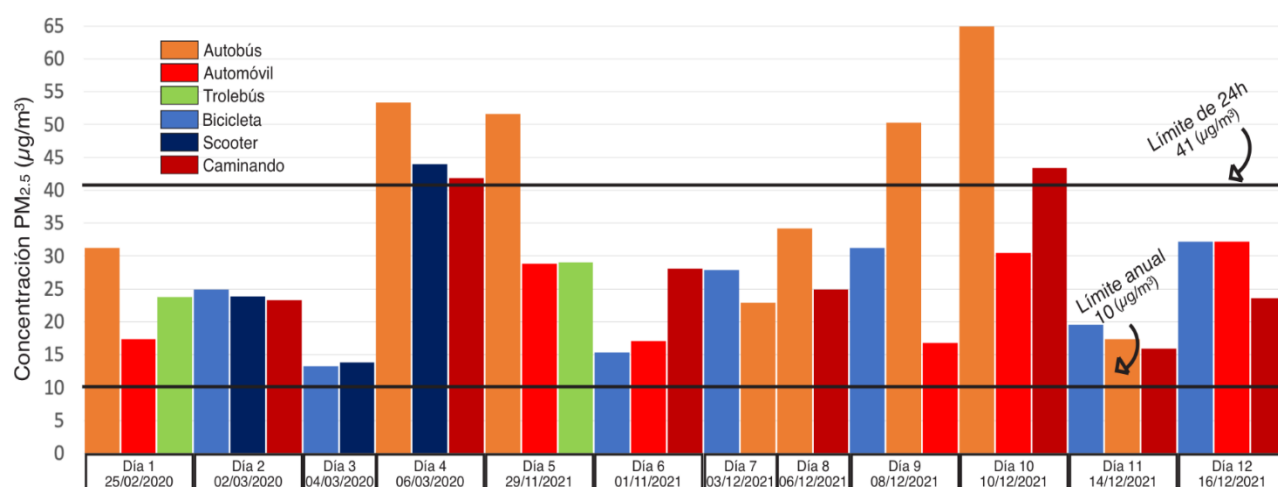


Figura 27. Comparación de los promedios de la concentración de exposición a PM_{2.5} en $\mu\text{g m}^{-3}$ por día en los diferentes modos de transporte medidos en este estudio contra los valores de referencia de 24-h y anual vigentes en la NOM-025-SSA1-2021.

Para facilitar la lectura de la información de los promedios generales, las Tablas 11 y 12 expresan el coeficiente de riesgo que se obtuvo en cada avenida haciendo uso de la “Guía de evaluación de riesgo para la salud humana” de US EPA (2009), la cual establece las ecuaciones y consideraciones dependiendo del contaminante para realizar un cálculo en el que indique si existe o no un riesgo en función del tiempo de exposición por parte de los usuarios. Además, se consideró el valor de toxicidad que se requiere como los valores límite permisibles de exposición a PM_{2.5}

establecidos por la NOM-025-SSA1-2021. Los cálculos pertinentes pueden ser revisados en el Anexo III.

Tabla 11. Coeficiente de riesgo calculado con los promedios de exposición para cada transporte en periodos de 24h y anual de la Av. MAQ.

Transporte	Promedio de exposición ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		Coeficiente de riesgo 24 h		Coeficiente de riesgo anual	
	Mañana	Tarde	Mañana	Tarde	Mañana	Tarde
Bicicleta	18	11	0.44	0.27	1.80	1.10
Autobús	63	18	1.54	0.44	6.30	1.80
Automóvil	23	14	0.56	0.34	2.30	1.40
Scooter	32	17	0.78	0.41	3.20	1.70
Trolebús	37	17	0.90	0.41	3.70	1.70
Caminando	26	21	0.63	0.51	2.60	2.10

En la Tabla 11 se muestra la información del coeficiente de riesgo para la Av. MAQ. comparado con un promedio de periodo de 24 horas y anual, en el cual el rebasar el valor de la unidad representa la existencia de un riesgo. La Tabla 11 muestra que el promedio diario los transportes no presentan un riesgo latente a excepción del autobús en el que el coeficiente de riesgo alcanza un valor de 1.54 en el horario matutino, mostrando un riesgo por exposición así sea un día el que se exponga. El promedio anual sugiere que todos los transportes tienen coeficientes de riesgo elevados, en general el riesgo es existente si se recorre la ruta de la Av. MAQ. de forma seguida o periódicamente, siendo el trolebús y autobús los transportes que representan un mayor riesgo y, el automóvil y la bicicleta los de menor riesgo.

Tabla 12. Coeficiente de riesgo calculado con los promedios de exposición para cada transporte en periodos de 24h y anual de la Av. REV.

Transporte	Promedio de exposición ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		Coeficiente de riesgo 24 h		Coeficiente de riesgo anual	
	Mañana	Tarde	Mañana	Tarde	Mañana	Tarde
Bicicleta	32	19	0.78	0.46	3.20	1.90
Autobús	35	28	0.85	0.68	3.50	2.80
Automóvil	28	21	0.68	0.51	2.80	2.10
Caminando	28	24	0.68	0.59	2.80	2.40

De igual forma para la Av. REV., la Tabla 12 compara el coeficiente riesgo de los transportes, y al igual que la Av. MAQ. se observa que para el promedio de 24 h el coeficiente de riesgo que se determinó en ambos horarios no es elevado, pero si la ruta es recorrida de manera continua o frecuente (tomando el promedio anual) el riesgo es existente para todos los transportes en ambos horarios, siendo el autobús el cual tiene el riesgo más elevado, sin embargo su valor es menor que el encontrado en la Av. MAQ. Por otro lado, el automóvil mostró el menor riesgo en el horario matutino y la bicicleta el menor riesgo en el horario vespertino

7. CONCLUSIONES

En el presente trabajo de investigación se realizó la medición de las concentraciones de exposición personal a $PM_{2.5}$ en diferentes modos de transporte que circulan sobre la Av. MAQ y Av. REV en la CDMX. Se consideraron modos de transporte activos y motorizados que utiliza la población para su traslado en el día a día, se analizaron diferencias entre transportes, horarios, rutas y posibles impactos de los cambios de actividades antropogénicas previo y durante la pandemia de COVID-19.

Tanto en la Av. MAQ como REV las mayores concentraciones de $PM_{2.5}$ fueron observadas de forma predominante en el horario de pico de tráfico vehicular matutino, lo cual fue presumiblemente debido a una mayor cantidad de vehículos automotores sobre las vialidades estudiadas en comparación con el horario de tráfico vespertino. Los horarios seleccionados en este estudio para realizar los estudios de medición de $PM_{2.5}$ permitieron obtener una idea general de las concentraciones a que está expuesta la población cuando se traslada en los horarios monitoreados a sus distintas actividades cotidianas. También permitieron conocer aquellos transportes que someten a una mayor exposición a la población en sus traslados diarios.

Las mayores exposiciones durante los recorridos realizados fueron determinadas en autobús a diésel en el horario de la mañana con promedios de 63 y 35 $\mu g\ m^{-3}$ en la Av. MAQ y REV, respectivamente. En contraste, los menores promedios fueron calculados para el horario de la tarde en bicicleta en la Av. MAQ (11 $\mu g\ m^{-3}$) y REV (19 $\mu g\ m^{-3}$). Los resultados sugieren que las concentraciones medidas de $PM_{2.5}$ dentro de los autobuses a diésel tengan una contribución de las emisiones provenientes de los automotores circundantes y del propio autobús monitoreado debido a procesos de autocontaminación. Sin embargo, se requieren más estudios para poder confirmar este proceso así como el porcentaje de contribución de exposición a $PM_{2.5}$ dentro del autobús a diésel.

El comportamiento de los valores de exposición a $PM_{2.5}$ mostró un descenso de estos durante las mediciones realizadas en el periodo de pandemia por COVID-19. Dicho comportamiento sugiere que la exposición a $PM_{2.5}$ en los modos de transporte

evaluados en este estudio son influenciados principalmente por las emisiones de los vehículos que circulan sobre las avenidas consideradas. Además de forma clara, la presencia de picos de exposición también disminuyó de forma clara.

El cálculo de exposición e inhalación integrada de $PM_{2.5}$ durante los traslados mostró que en las Avs. MAQ y REV los medios de transporte activos caminando y bicicleta, además del scooter, presentaron los mayores valores debido a que sus tiempos de traslado son más largos y que sus microambientes al carecer de cabina se encuentran más expuestos a emisiones provenientes de automotores circulando en el arroyo vial contiguo. De los transportes motorizados monitoreados, el autobús mostró las mayores concentraciones de exposición e inhalación debido al ingreso de emisiones de $PM_{2.5}$, y presumiblemente, por procesos de autocontaminación.

Durante finales del año 2020 se renovó la flota de trolebuses que circulan sobre la Av. MAQ denominados “Cero Emisiones”, sin embargo, no se observó una variación significativa entre la exposición medida en los trolebuses equipados con nueva tecnología contra los trolebuses que circulaban previamente. Finalmente, la comparación como referencia de las concentraciones medidas de $PM_{2.5}$ en los medios de transporte contra la normativa vigente aplicable NOM-025-SSA1-2014 de promedio anual de $12 \mu g m^{-3}$ mostró que los promedios calculados de exposición fueron significativamente mayores que esta, aunque debe ser resaltado que dichos promedios consideran diferentes escalas temporales.

Los resultados obtenidos en el presente estudio mostraron que los medios de transporte que circulan dentro del arroyo vehicular son impactados en mayor medida que aquellos que circulan a cierta distancia enfrente de éste. Además, protecciones físicas y tecnológicas como el uso de aires acondicionados y ventanas cerradas proveen protección del ingreso de plumas de emisiones de $PM_{2.5}$ al interior de las cabinas de transporte motorizados, protegiendo así la salud de sus usuarios. Esta información puede ser útil para que los tomadores de decisiones implementen renovaciones de flotas de transporte, ciclistas y andadores peatonales amigables con la salud de la población con el objeto de proteger su salud.

8. REFERENCIAS

Contreras, A., García, G., Icaza, B., & Montiel, G. (2013). Calidad del aire: una práctica de vida. *Centro de Educación y Capacitación para el Desarrollo Sustentable: SEMARNAT*, 28.

Cortes, S. (2018). Material Particulado en el aire y su correlación con la función pulmonar en personas que realizan actividad física en la cicloruta en la localidad Kennedy en Bogotá: Estudio Descriptivo Transversal. *Universidad Nacional de Colombia*. Bogotá.

Falcon Rodriguez, C. I., Osornio Vargas, A. R., Sada Ovalle, I., & Segura Medina, P. (2016). Aeroparticles, Composition, and Lung Diseases. *Frontiers in Immunology*.

Belalcazar, Luis & Guevara-Luna, Marco & Castillo Camacho, Maria. (2020). Personal Exposure to PM_{2.5} in the Massive Transport System of Bogotá and Medellín, Colombia. *Asian Journal of Atmospheric Environment*. 14. 210. 10.5572/ajae.2020.14.3.210.

Hernández Paniagua, I., Andraca Ayala, G., Ayala, U. D., Ruiz Suarez, L., Zavala Reyes, J., Bouscoulet, L. T., . . . Jazcilevich, A. (2018). Personal Exposure to PM_{2.5} in the Megacity of Mexico: A Multi-Mode Transport Study. *Atmosphere MDPI*.

Hertel, O., Hvidberg, M., Ketzel, M., Storm, L., & Stausgaard, L. (2008). A proper choice of route significantly reduces air pollution exposure — A study on bicycle and bus trips in urban streets. *Science of the Total Environment*, 58–70.

Instituto Nacional de Ecología (INE). (2010). Manual 1: Principios de Medición de la Calidad del Aire, México, 43.

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2005). Evaluación de los beneficios en la exposición personal de pasajeros por la instrumentación de cambios en el transporte público. México: Centro Transporte Sustentable.

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2011). Guía metodológica para la estimación de emisiones de PM_{2.5}. México: SEMARNAT.

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2013). Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero. Obtenido de Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero: <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero>

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) (2015). Informe Nacional de Calidad del Aire 2015, México. SEMARNAT

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2016). Estimación de impactos en la salud por contaminación atmosférica en la región centro del país y alternativas de gestión. México, 72.

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2019). Estado de la Calidad del Aire en México, México.

Instituto Nacional de Salud Pública (INSP). (2016). Estimación de impactos en la salud por contaminación atmosférica en la región centro del país y alternativas de gestión. Cuernavaca Morelos.

Jazcilevich, A., Vázquez, J. M. M., Ramírez, P. L., & Pérez, I. R. (2015). Economic-environmental analysis of traffic-calming devices. *Transportation research part D: transport and environment*, 36, 86-95.

Krewski D, Rainham D. (2007). Ambient air pollution and population health: overview. *J Toxicol Environ Health A*. ;70(3-4):275-83. doi: 10.1080/15287390600884859. PMID: 17365590.

NOM-025-SSA1. (2014). *Secretaría de Salud*. Obtenido de Diario Oficial: <http://sigajalisco.gob.mx/aire/normas/NOM-025-SSA1-2014.pdf>

NOM-025-SSA1. (2021). *Secretaría de Salud*. Obtenido de Diario Oficial: https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5633855&fecha=27/10/2021#gsc.tab=0

OEHHA, Office of Environmental Health Hazard Assessment. (2020). PM_{2.5}. Obtenido de OEHHA: <https://oehha.ca.gov/calenviroscreen/indicator/pm25>

Okokon, E. O., Yli-Tuomi, T., Turunen, A. W., Taimisto, P., Pennanen, A., Vouitsis, I., . . . Lanki, T. (2017). Particulates and noise exposure during bicycle, bus and car commuting: A study in three European cities. *Environmental Research* , 181–189.

Ortega, A. (2021). Estados preparan el retorno 100 % presencial a las escuelas. *Expansión*. <https://politica.expansion.mx/mexico/2021/11/11/estados-preparan-el-retorno-100-presencial-a-las-escuelas>

Panchal, R., Marios, P., May, H., Obszynska, J., Evans, M., Hansell, A., Gulliver, J., Vande, J. (2022). Personal air pollution exposure during morning commute car and active transport journeys. *Journal of Transport & Health*. 26. 101365. 10.1016/j.jth.2022.101365.

Quénel, P., W. Dab, et al. (2003). Qualité de l'air ambiant. Environment et santé publique. Fondements et pratiques. M. Gérin, P. Gosselin, S. Cordier et al. Québec, *EDISEM*, TEC & DOC: 291-315.

Quiros , D. C., Lee, E. S., Wang, R., & Zhu, Y. (2014). Ultrafine particle exposures while walking, cycling, and driving along an urban residential roadway. *Atmospheric Environment*, 185-194.

Riojas-Rodríguez, H., Álamo, U., Texcalac-Sangrador, J., & Romieu, I. (2009). Estado del conocimiento sobre los efectos en la salud asociados a la contaminación del aire en la población de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. México: *Instituto Nacional de Salud Pública*, 117.

Romieu I, Korc M. (2002). Contaminación del aire exterior. Contaminación ambiental y salud de los niños en América Latina y El Caribe. México: *Instituto Nacional de Salud Pública*, p.109–129.

Secretaría del Medio Ambiente (SEDEMA). (2018). Informe Anual de Calidad del Aire 2017 CDMX, México, 160.

Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2015). Evaluación de Partículas Suspendidas PM_{2.5} en el Área Metropolitana de la Ciudad de México. México.

Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2020). Programa para mejorar la calidad del aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2011-2020. México, *PROAIRE*, 17

SIAFA (2019). Características: Aetalómetro microAeth® / AE51. *SIAFA: Higiene Ocupacional y Medio Ambiente*. <https://siafa.com.ar/producto-detalle/ae51>

US EPA (2009). Guía de la evaluación de riesgo para la salud humana. *Environmental Protection Agency*. Washington, D.C. <https://semspub.epa.gov/work/HQ/140530.pdf>

World Health Organization. Occupational and Environmental Health Team. (2006). Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre: actualización mundial 2005. *World Health Organization*. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/69478>

World Health Organization. (2021). WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. *World Health Organization*. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329>. License: CC BY-NC-SA 3.0 IGO

9. ANEXOS

Anexo I. Memoria de cálculo de exposición

Teniendo los intervalos de la ventana de exposición de cada transporte en la Tabla 5 y con ayuda de la siguiente ecuación se calculó la exposición en promedios de los segundos de ventana de cada transporte [a,b] en el número total de datos del recorrido.

$$\text{exposición } a [\mu\text{g}/\text{m}^3] = \frac{C1 + C2 + \dots + Ca}{a} \dots\dots\dots (1a)$$

$$\text{exposición } b [\mu\text{g}/\text{m}^3] = \frac{C1 + C2 + \dots + Cb}{b} \dots\dots\dots (1b)$$

Donde

[a, b] = Primer y segundo dato en función de la duración de la ventana de exposición de cada transporte

C = Concentración medida por equipo de monitoreo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Con la ecuación 1a y 1b obtenemos el valor de exposición en un intervalo de datos, para continuar con el cálculo de la exposición de recorrido.

$$\text{Exposición de recorrido } a [\mu\text{g}/\text{m}^3] = \text{exp } a1 + \text{exp } a2 + \dots + \text{exp } am (\mu\text{g}/\text{m}^3) \dots (2a)$$

$$\text{Exposición de recorrido } b [\mu\text{g}/\text{m}^3] = \text{exp } b1 + \text{exp } b2 + \dots + \text{exp } bm (\mu\text{g}/\text{m}^3) \dots (2b)$$

Donde m = Número de promedios calculados dependiente de la ventana de exposición de cada transporte

La exposición de recorrido se obtiene promediando las ecuaciones 2a y 2b que son la suma de los promedios de las ventanas de exposición de cada transporte.

$$\text{Exposición de recorrido} [\mu\text{g}/\text{m}^3] = \frac{\text{Exposición de recorrido a} + \text{Exposición de recorrido b}}{2} \dots\dots(3)$$

Obtenido el valor de la ecuación 3 se determina la exposición que se tuvo en promedio por cada transporte en función de los recorridos realizados.

$$\text{Exposición de transporte} [\mu\text{g}/\text{m}^3] = \frac{\text{Exp R1} + \text{Exp R2} + \dots + \text{Exp Rp} (\mu\text{g}/\text{m}^3)}{p} \dots\dots\dots(4)$$

Donde p = Número de recorridos realizados por cada transporte

Para el cálculo de la exposición por transporte en función del tiempo y la distancia se utilizaron las siguientes expresiones:

$$\text{Exposición de transporte en función del tiempo} [\mu\text{g}/\text{m}^3\text{h}] = \frac{\text{Exposición de transporte} (\mu\text{g}/\text{m}^3)}{\text{Tiempo promedio de recorrido (h)}} \dots\dots(5a)$$

$$\text{Exposición de transporte en función de la distancia} [\mu\text{g}/\text{m}^3\text{km}] = \frac{\text{Exposición de transporte} (\mu\text{g}/\text{m}^3)}{\text{Distancia de recorrido (km)}} \dots\dots(5b)$$

Anexo II. Memoria de cálculo de inhalación

De igual forma que en el anexo I se utilizan los datos de la tabla 5 para obtener el volumen de aire inhalado.

$$V_{[m^3/respiración]} = \frac{V_E (L/min)}{TR (respiración/min)} \dots\dots\dots (6)$$

Donde:

V = Volumen de aire inhalado por cada respiración (m^3)

V_E = Volumen de aire inhalado por minuto (L/min)

TR = tasa de respiraciones por minuto (1/min)

Para el cálculo de la inhalación se toman los resultados de la ecuación 1a, 1b, y 6 para determinar su valor promedio calculado de la ventana de exposición de cada intervalo de tiempo de respiración [a, b].

$$Inh\ a\ [\mu g] = exposición\ a\ (\mu g/m^3) \cdot V(m^3) \dots\dots\dots (7a)$$

$$Inh\ b\ [\mu g] = exposición\ b\ (\mu g/m^3) \cdot V(m^3) \dots\dots\dots (7b)$$

Donde:

Inh = Inhalación (μg)

V= Volumen de aire inhalado por cada respiración (m^3)

[a, b] = Primer y segundo dato en función de la duración de la ventana de exposición de cada transporte.

Con la ecuación 7a y 7b obtenemos el valor de inhalación en un intervalo de datos, para continuar con el cálculo de la inhalación de recorrido.

$$Inhalación\ de\ recorrido\ a\ [\mu g] = inh\ a1 + inh\ a2 + \dots + inh\ am\ (\mu g) \dots (8a)$$

$$Inhalación\ de\ recorrido\ b\ [\mu g] = inh\ b1 + inh\ b2 + \dots + inh\ bm\ (\mu g) \dots (8b)$$

Donde:

m = Número de promedios calculados dependiente de la ventana de exposición de cada transporte.

La inhalación de recorrido se obtiene promediando las ecuaciones 8a y 8b que son la suma de los promedios de las ventanas de exposición de cada transporte.

$$\text{Inhalación de recorrido } [\mu g] = \frac{\text{Inhalación de recorrido a} + \text{Inhalación de recorrido b}}{2} \dots\dots(9)$$

Obtenido el valor de la ecuación 9 se determina la inhalación que se tuvo en promedio por cada transporte en función de los recorridos realizados.

$$\text{Inhalación de transporte } [\mu g] = \frac{\text{Inh R1} + \text{Inh R2} + \dots + \text{Inh Rp } (\mu g)}{p} \dots\dots\dots(10)$$

Donde p = Número de recorridos realizados por cada transporte.

Para el cálculo de la inhalación por transporte en función del tiempo y la distancia se utilizaron las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} \text{Inhalación de transporte en función del tiempo } [\mu g/h] = \\ \frac{\text{Inhalación de transporte } (\mu g)}{\text{Tiempo promedio de recorrido (h)}} \dots\dots(11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Inhalación de transporte en función de la distancia } [\mu g/km] = \\ \frac{\text{Inhalación de transporte } (\mu g)}{\text{Distancia de recorrido (km)}} \dots\dots(12) \end{aligned}$$

Anexo III. Memoria de cálculo de coeficiente de riesgo

De la tabla 11 y 12 se toman los valores de promedio de exposición de cada transporte y se utiliza la ecuación 7 de US EPA (2009) la cual al tomar en cuenta una exposición aguda, se iguala la concentración del contaminante en el aire con la concentración de exposición.

$$CE [\mu g/m^3] = CA (\mu g/m^3) \dots (13)$$

Donde:

CE = Concentración de exposición ($\mu g/m^3$)

CA = Concentración de contaminante en el aire ($\mu g/m^3$)

Posteriormente utilizamos la ecuación 12 de US EPA (2009) con ayuda de los valores límite establecidos en 24 horas y anualmente en la NOM-025-SSA1-2021 visto en la sección de “Normatividad y riesgo” y se calcula el coeficiente de riesgo.

$$CR [\mu g/m^3] = \frac{CE (\mu g/m^3)}{VT (\mu g/m^3)} \dots (14)$$

Donde:

CE = Concentración de exposición ($\mu g/m^3$)

CR = Concentración de contaminante en el aire ($\mu g/m^3$)

VT = Valor de riesgo de toxicidad por inhalación del contaminante ($\mu g/m^3$)