



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

ESTUDIO DE LA EXPOSICIÓN PERSONAL A $PM_{2.5}$ EN EL
SISTEMA DE TRANSPORTE COLECTIVO DE LA CIUDAD DE
MÉXICO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

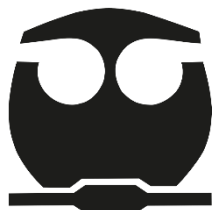
INGENIERA QUÍMICA

PRESENTA

ASHLEY TIBURCIO

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Iván Yassmany Hernández Paniagua



CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX. 2019



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: José Agustín García Reynoso

VOCAL: Profesor: Sergio Adrián García González

SECRETARIO: Profesor: Iván Yassmany Hernández Paniagua

1er. SUPLENTE: Profesor: Alejandra Mendoza Campos

2° SUPLENTE: Profesor: Gema Luz Andraca Ayala

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

Centro de Ciencias de Atmósfera, Ciudad Universitaria, CD.MX.

ASESOR DEL TEMA:

Dr. Iván Yassmany Hernández Paniagua

SUPERVISOR TÉCNICO:

Dra. Gema Luz Andraca Ayala

SUSTENTANTE:

Ashley Tiburcio

AGRADECIMIENTOS

A mi alma mater, la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Química por abrirme sus puertas, por brindarme la oportunidad de desarrollarme personal y académicamente y honrarme con ser una universitaria con propósitos y visión dirigidos hacia el enriquecimiento y mejora de mi entorno.

Al Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) que con sus espacios, equipos, personal y colaboradores me permitieron realizar este trabajo que se desarrolló con tanto esmero y entusiasmo.

A cada uno de los integrantes del jurado asignado por su tiempo dedicado a la revisión apropiada de mi tesis, por sus sugerencias, observaciones y correcciones.

A la Dra. Gema Luz Andraca quien me abrió las puertas al CCA, colaboró siempre en lo que fuera necesario y me orientó en los aspectos técnicos de mi trabajo, y a quien admiro mucho por su dedicación en lo que hace.

Al Dr. Arón Jazcilevich por estar al pendiente e interesado en todo momento en la dirección de este trabajo y por siempre mostrar un invaluable entusiasmo.

Al Dr. Iván Yassmany Hernández P. por su apoyo, paciencia y tiempo dedicado en la asesoría, supervisión y enseñanzas durante el desarrollo de este proyecto, sin el cual no se lograría concluir satisfactoriamente este estudio y de quien me llevó una gran admiración y reconocimiento por su constante entrega en su profesión.

A la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Ciudad de México por el financiamiento recibido para la realización del presente estudio a través del proyecto SECITI/103/2016.

Al Centro Mario Molina para Estudios Estratégicos sobre Energía y Medio Ambiente por facilitar equipos para la realización del presente proyecto y en particular al Dr. Antonio Mediavilla Sahagún y a la M.C. Jennifer García Escalante.

DEDICATORIAS

Con todo mi cariño y gratitud:

A mi familia, Daysi y Sara (mis dos grandes madres) por llenarme de amor, por darme consejos y por siempre guiarme en este camino de la vida. Ma y mami hoy puedo decir que a pesar de las circunstancias salimos adelante, la perseverancia es lo que nos distingue, y me llena de alegría y dicha poder compartir mis logros con ustedes, infinitas gracias por su apoyo, esfuerzos y sacrificios, las amo mucho. Mamá sin sus enseñanzas esto no hubiera sido posible, estoy feliz y agradecida por no haberse dado por vencida nunca y llegar a estar a mi lado en este momento tan importante para mí.

A mis compañeros y amigos Sam, Mau A, Lupita, Michel y René por su esfuerzo y dedicación en la ejecución de este trabajo, por ser parte de las campañas de muestreo, por aportar ideas, y brindarme tanto apoyo y sonrisas siempre.

A Luza, Ami, Lola, Chavira, María, Manolo y Alba, amigos que han marcado mi vida por completo y de quienes recibí tanto cariño y apoyo.

A Mau M. por guiarme a lo largo de la carrera, con quien comparto este logro por ser un gran amigo y compañero, gracias por tus consejos, asesorías, explicaciones, recordatorios y colaboraciones en trabajos, tareas y proyectos, pero sobre todo gracias por tantas sonrisas y momentos inolvidables.

Y finalmente y no menos importante, a cada uno de mis profesores a lo largo de mi vida que con sus enseñanzas me ayudaron a subir escalón por escalón esta escalera con dirección hacia mis metas, siendo una de ellas el concluir una carrera universitaria: la Ingeniería Química.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	3
1 MARCO TEORICO Y ANTECEDENTES	4
1.1 LA EXPOSICIÓN PERSONAL A CONTAMINANTES	4
1.2 ¿QUÉ ES EL MATERIAL PARTICULADO?	6
1.3 CLASIFICACIÓN DEL MATERIAL PARTICULADO Y COMPOSICIÓN	6
1.4 LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE POR PM	11
1.5 PM _{2.5} Y SUS EFECTOS EN LA SALUD	16
1.6 REGULACIÓN NACIONAL E INTERNACIONAL DE LOS NIVELES AMBIENTE DE PM	18
1.7 EL TRANSPORTE DE LA POBLACIÓN EN LA ZMVM	20
1.8 ANTECEDENTES DE LA EXPOSICIÓN A PM _{2.5} EN MEDIOS DE TRANSPORTE	23
2 OBJETIVOS	26
2.1 OBJETIVO GENERAL	26
2.2 OBJETIVOS PARTICULARES	26
3 METODOLOGIA.....	27
3.1 DISEÑO EXPERIMENTAL	27
3.2 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	30
3.2.1 Metro	32
3.2.2 Metrobús	33
3.3 CAMPAÑAS DE MUESTREO.....	35
3.3.1 Instrumentación	35
3.3.2 Calibración de los monitores personales de PM _{2.5}	36
4 RESULTADOS	39
4.1 EXPOSICIÓN PERSONAL A PM _{2.5} EN METRO	39
4.1.1 Metro Línea 1.....	39
4.1.2 Metro Línea 3.....	45
4.1.3 Comparación entre temporadas y líneas del metro	51

4.2 EXPOSICIÓN PERSONAL A PM _{2.5} EN METROBÚS	53
4.2.1 Metrobús Línea 1.....	53
4.2.2 Metrobús Línea 2	59
4.2.3 Comparación entre temporadas y líneas del Metrobús.....	65
4.3 COMPARACIÓN ENTRE TRANSPORTES, ESTUDIOS PREVIOS Y NORMATIVIDAD.....	68
5 CONCLUSIONES	70
6 REFERENCIAS	72
7 ANEXOS.....	79
ANEXO I. METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN 0 DE PDR	79
ANEXO II. METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN DE FLUJO PDR.....	79
ANEXO III. METODOLOGÍA DE USO DE PDR (MEDICIÓN)	80
ANEXO IV. METODOLOGÍA PARA DESCARGA DE DATOS PDR	81
ANEXO V. INSTRUCCIONES DE USO DEL GPS	81
ANEXO VI. INSTRUCCIONES DE USO DE LAS CÁMARAS	82
ANEXO VII. ESTADÍSTICOS DE CAMPAÑA DE MUESTREO EN TEMPORADA SECA FRÍA	83
ANEXO VIII. ESTADÍSTICOS DE CAMPAÑA DE MUESTREO EN TEMPORADA SECA CALIENTE	93
ANEXO IX. TABLA RESUMEN DE PROMEDIOS GLOBALES OBTENIDOS EN METRO Y METROBÚS.....	103
ANEXO X. COMPARACIÓN DE TRANSPORTES DE METRO Y METROBÚS CON GRÁFICAS DE CAJAS	104
ANEXO XI. BITÁCORA DE REGISTRO DE AUTOBUSES EMPLEADOS EN CAMPAÑAS DE MUESTREO EN MB	106
ANEXO XII. ESTIMACIÓN DE LA EXPOSICIÓN PROMEDIO PARA UNA JORNADA LABORAL.....	107

INTRODUCCIÓN

En la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), mejorar la calidad del aire ha sido uno de los retos de mayor complicación para las autoridades ambientales desde los años 90s (PROAIRE-CDMX, 2011). El Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México ha reportado, que en la ZMVM los niveles ambiente del material particulado de diámetro aerodinámico menor a 2.5 micras ($PM_{2.5}$) rebasan de forma recurrente cada año los niveles máximos permitidos establecidos en la norma de calidad del aire y salud vigentes aplicables (SEDEMA, 2017). Esto tiene una implicación importante para la salud de la población de la ZMVM, ya que la exposición poblacional a niveles ambiente elevados de $PM_{2.5}$ se ha asociado con el desarrollo de enfermedades cardiovasculares y respiratorias.

El Inventario de Emisiones de la Ciudad de México año base 2014 reporta que en la ZMVM durante las últimas dos décadas, la población y la mancha urbana se han extendido de forma significativa lo que ha provocado el incremento en el tiempo de traslado y distancia recorrida de personas, bienes y mercancías, afectando directamente la calidad del aire y por lo tanto la salud pública. De esta forma, resulta vital contar con información de los niveles de concentración de $PM_{2.5}$ a los que la población está expuesta en la ZMVM durante dichos recorridos con el fin de prevenir el traslado por zonas críticas y minimizar dicha exposición.

En el presente estudio, se reportan los niveles de exposición personal a $PM_{2.5}$ en diferentes horarios en los sistemas de transporte público de mayor concurrencia, que cubren rutas de Norte a Sur y de Este a Oeste dentro de la ZMVM, líneas 1 y 3 del Metro y, líneas 1 y 2 del Metrobús. Además, se discuten los niveles de exposición según el transporte evaluado, su tecnología y condiciones externas. Tal información puede ser usada por las autoridades en la materia durante el proceso de diseño y/o modificación de mobiliario urbano y rutas de transporte, con el objetivo de disminuir la exposición de los usuarios, y para disminuir los riesgos de salud de la población vulnerable.

1 MARCO TEORICO Y ANTECEDENTES

1.1 La exposición personal a contaminantes

La exposición a contaminantes es el contacto con un contaminante en específico y por un periodo de tiempo especificado, en el borde entre un ser humano y el medio ambiente (ATSDR, 2009).

La exposición se puede presentar en diferentes tipos de ambiente, los cuales se pueden clasificar de la siguiente manera, acorde con clasificación de la Agencia para sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR):

- Ambiente interior y externo: Comprende el ambiente dentro del cuerpo y el cuerpo exterior. Posee tres barreras protectoras: la piel de agentes externos, el tracto gastrointestinal de toxinas ingeridas y los pulmones de contaminantes inhalados.
- Ambiente personal, el que puede controlar el individuo y medio ambiente que es el ambiente que no puede controlar el individuo.
- Ambientes gaseosos como el aire, líquidos como el agua y sólidos como el suelo.
- Ambientes químicos, biológicos, físicos y socioeconómicos: tales como pesticidas y desechos tóxicos, organismos que causen enfermedades y se encuentren en agua o comida, elementos que repercuten en la salud y bienestar y estado económico que repercuta en la salud respectivamente.

Una forma de clasificar la exposición es a partir de la duración de exposición:

- Exposición Aguda (menos de 24 horas)
- Exposición Crónica (más de tres meses)
- Exposición Subaguda (menos de un mes)
- Exposición Subcrónica (entre uno y tres meses)

Por otro lado, para la evaluación de la exposición es importante identificar las llamadas rutas de exposición, las cuales son tres: cutánea (por piel), ingestión (por el estómago o sistema digestivo) e inhalación (por el sistema respiratorio).

En este estudio la ruta de exposición a evaluar es por inhalación, esta es la forma más fácil y rápida de exposición. Los factores que intervienen en la absorción respiratoria y la salud pública son: la concentración de la sustancia tóxica en el aire, la solubilidad de la sustancia tóxica en la sangre y los tejidos, la tasa de respiración y el estado del tracto respiratorio, la duración de la exposición y el tamaño de la partícula tóxica (ATSDR, 2009).

Los estudios de exposición general de la población han demostrado la complejidad de la exposición personal ya que se encuentra representada por diferentes microambientes. Esto es debido al hecho de que la exposición es una función del tiempo y del espacio; las personas son expuestas a una variedad de compuestos y niveles de contaminantes en función de su actividad, costumbres y estilo de vida (Pascual, 2005).

La representatividad de los puntos de muestreo en estaciones fijas como indicadores de exposición es siempre un punto de discusión. Algunos estudios han mostrado bajas correlaciones entre valores de exposición y aquellos derivados de las redes de monitoreo (Pascual, 2005). Es por ello que, más allá de los criterios legislativos, contar con medidas directas de exposición a contaminantes a través de mediciones en campo puede permitir contar con información más precisa para la estimación de los niveles de exposición personal en un microambiente de interés, tal como los sistemas de transporte Metro y Metrobús de la ZMVM.

1.2 ¿Qué es el material particulado?

El material particulado (PM) también conocido como partículas suspendidas, es una mezcla compleja de sustancias en estado líquido o sólido que permanecen suspendidas en la atmósfera por periodos variables de tiempo (SSA, 2014). El PM varía en tamaño hasta en varios órdenes de magnitud, desde unos nanómetros (nm) a varios micrómetros (μm), lo que influye en el tiempo de residencia de las partículas en la atmósfera (Heal, Kumar, & Harrison, 2012). De acuerdo con su diámetro aerodinámico, las PMs se clasifican en menores o iguales a 10 micras (PM_{10}), en menores o iguales a 2.5 micras ($\text{PM}_{2.5}$) y en menores o iguales a 0.1 micras ($\text{PM}_{0.1}$), también conocidas como partículas ultrafinas (UFP).

Las PMs pueden presentar diversas formas y morfologías, que incluyen esferas, fragmentos cristalinos o irregulares, agujas, aglomerados y entidades dendríticas. Las partículas individuales pueden ser químicamente uniformes, o pueden contener un núcleo químicamente diferente y sus alrededores con material diverso. Lo cual es consecuencia de las diferentes fuentes de emisión de PMs en el ambiente (Heal, Kumar, & Harrison, 2012). Según su origen, las PMs también pueden clasificarse en primarias, que son aquellas producidas directamente por alguna fuente contaminante y en secundarias, las que se forman en la atmósfera, como resultado de la interacción química entre sustancias tales como SO_x y NO_x , entre otros (Heal, Kumar, & Harrison, 2012).

1.3 Clasificación del material particulado y composición

En zonas urbanas las principales fuentes de emisión de PM, y en general de contaminantes, pueden ser clasificadas en fuentes fijas, móviles y fugitivas (SEMARNAT, 2010):

- a) *Las fuentes fijas* abarcan las emisiones generadas por la quema de combustibles producto de actividades industriales y residenciales, ya sea para la generación de energía, calor o vapor y otros procesos industriales. También incluyen las emisiones generadas por la quema de otros combustibles como la biomasa asociada a la calefacción de viviendas.

- b) *Las fuentes móviles* corresponden a las emisiones provenientes de los gases del escape, desgaste de frenos y neumáticos de distintos tipos de automotores: automóviles, camiones, buses y motocicletas.
- c) *Las fuentes fugitivas* consisten en emisiones que no son canalizadas por ductos, chimeneas u otros sistemas hacia el exterior, tales como emisiones provenientes de calles pavimentadas y sin pavimentar, así como de construcción, demolición, entre otras. El PM asociado a este tipo de fuentes corresponde principalmente a partículas gruesas, con alrededor del 90 % en partículas mayores a 2.5 μm .

Las emisiones fugitivas también tienen un origen natural, debido a la suspensión de tierra o erosión de rocas por acción del viento. Sus tasas de emisión dependen fuertemente de parámetros meteorológicos como la velocidad del viento, humedad ambiental y precipitaciones.

Se presenta a continuación la clasificación de las fuentes de emisión de contaminantes reportada en el Inventario de emisiones de la CDMX año base 2014, que es similar a la mencionada por la SEMARNAT 2010 con algunas modificaciones en los términos empleados:

- a) *Fuentes puntuales*. Instalaciones de ubicación fija, que tiene como propósito ejecutar operaciones o procesos industriales, comerciales, o de servicios, que generen emisiones contaminantes a la atmósfera. También se les conoce como fuentes fijas e incluye a las industrias, así como los comercios y servicios regulados.
- b) *Fuentes de área*. Instalaciones emisoras de contaminantes, que son pequeñas, numerosas y dispersas, pero que en conjunto, las emisiones pueden ser considerables. Incluyen las emisiones domésticas, de combustibles, de solventes, residuos, agrícolas y ganaderas, entre las

principales. En esta fuente se incluyen los comercios y servicios no regulados.

- c) *Fuentes móviles*. Cualquier transporte automotor que circula por vialidades. Para fines de este documento, también se les conoce como sector transporte.
- d) *Fuentes naturales*. Cualquier fuente o proceso natural en la vegetación y los suelos que genere emisiones, para este inventario, incluye las emisiones biogénicas (COV de vegetación y NO_x de los suelos) y a la erosión eólica.

Las PMs también se pueden clasificar por origen natural (a partir de la naturaleza) o antropogénico (efectos producidos por las actividades humanas en el medio ambiente de la Tierra). La Figura 1 muestra la clasificación de las PM_{2.5} según su origen, fuentes primarias o secundarias y su descripción si es de origen natural o antropogénico:

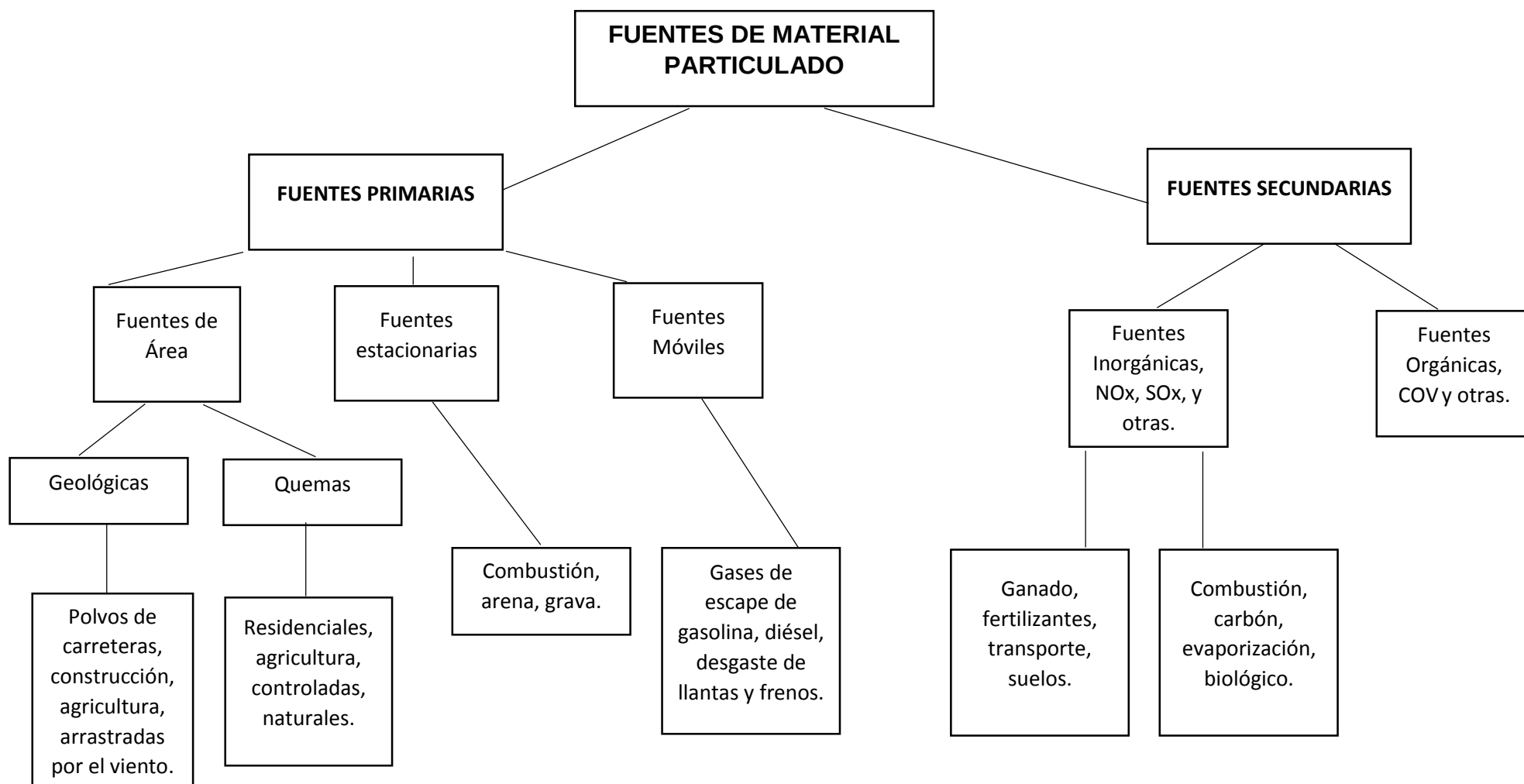


Figura 1. Clasificación de las fuentes de material particulado. Adaptado de Allen & Olaguer, 2014.

Tabla 1. Principales constituyentes de PM en el aire y sus principales fuentes.

Adaptado de Heal, Kumar & Harrison, 2012.

COMPONENTES	FUENTES
Sulfato (SO_4^{2-})	Presente principalmente como un componente de sulfato de amonio secundario ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) de la oxidación atmosférica de SO_2 , seguido de reacción con gas NH_3 derivado principalmente de fuentes agrícolas, aunque puede haber un pequeño componente primario derivado de las emisiones de partículas de sal marina o materia mineral como el yeso.
Nitrato (NO_3^-)	Componente secundario normalmente presente como nitrato de amonio (NH_4NO_3), que resulta de la neutralización por NH_3 del vapor de HNO_3 derivado de la oxidación de las emisiones de NO_x , o como nitrato de sodio (NaNO_3) debido al desplazamiento del cloruro de hidrógeno del NaCl por el vapor de HNO_3 .
Amonio (NH_4^+)	Generalmente presente en forma de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ o NH_4NO_3 a partir de las emisiones de NH_3 .
Iones de sodio y cloro (Na^+, Cl^-)	De emisiones primarias de partículas de sal marina.
Carbón elemental	Carbono negro formado durante la combustión a altas temperatura de combustibles fósiles y de biomasa.
Carbón Orgánico	Carbono en forma de compuestos orgánicos, ya sean primarios de fuentes automotrices o industriales, o secundarios de la oxidación de compuestos orgánicos volátiles (COV).
Material Mineral	Materiales de la corteza ricos en elementos como Al, Si, Fe y Ca. Están presentes en los polvos gruesos primarios que surgen del arrastre impulsado por el viento de suelo, material mineral, canteras, construcción y demolición.
Agua	Componentes hidrosolubles, especialmente $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, NH_4NO_3 y NaCl , que absorben agua de la atmósfera a una humedad relativa alta, pasando de sólidos cristalinos a gotas líquidas.

Otros componentes químicos presentes en menor proporción son el fosfato (PO_4)₃ y metales tales como Pb, Cd, Hg, Ni, Cr, Zn, Mn, emitidos desde una amplia gama de industrias metalúrgicas, del desgaste del motor de vehículos, frenos, neumáticos, combustión de combustible impuro (especialmente carbón) y, combustible y aditivos para aceites lubricantes (Heal, Kumar, & Harrison, 2012). Sin embargo, la composición exacta puede variar notablemente con el rango de tamaño de las partículas, ubicación y meteorología predominante.

Así, la composición química y el tamaño de las partículas que pueden afectar la salud de la población causando daños específicos, varían de un sitio a otro y de región a región, dependiendo de la fuente de emisión y, condiciones geográficas y meteorológicas (Heal, Kumar, & Harrison, 2012).

1.4 La contaminación del aire por PM

La contaminación atmosférica por PM es la alteración de la composición natural del aire como consecuencia de la entrada de partículas en suspensión, ya sea de forma natural o por eventos antropogénicos (MITECO, 2011). Los efectos de la contaminación del aire por PM se han observado en la salud humana, el clima y los ecosistemas. El PM puede incrementar la mortalidad por causas respiratorias y cardiovasculares, además también puede afectar al crecimiento vegetal, a la fauna, influir en los cambios de temperatura e incluso alterar los patrones de precipitación y la relación entre la radiación reflejada y la incidente (MITECO, 2011). Por ello, contar con un aire limpio es una de las principales aspiraciones de los ciudadanos y uno de los retos más importantes para las autoridades.

La mayor parte de las zonas urbanas en el mundo comparten el problema de la contaminación del aire a consecuencia de una concentrada demanda de servicios, transporte y energía, lo que ha derivado en la emisión constante de contaminantes incluyendo los compuestos conocidos típicamente como criterio los cuales han sido estudiados constantemente por sus efectos dañinos a la salud humana (PROAIRE-CDMX, 2011). La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA, por sus siglas en inglés) los denominó “contaminantes criterio” porque sus normas de calidad del aire se basaban en documentos llamados “documentos criterio”. En la actualidad, el término de contaminantes criterio se usa para referirse a los siguientes contaminantes: dióxido de Azufre (SO_2), dióxido de Nitrógeno (NO_2), plomo (Pb), monóxido de Carbono (CO), compuestos orgánicos volátiles (COV), compuestos orgánicos totales (COT), ozono (O_3) y partículas $\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10} (PROAIRE-CDMX, 2011).

El monitoreo de los contaminantes criterio resulta importante para el entendimiento de los cambios en la atmosférica y en el ambiente. La ciudad de México cuenta con una Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA), que está integrada por más de 41 estaciones de monitoreo ubicadas en la ZMVM y brinda información del estado de la calidad del aire por zona y región (SEDEMA-CDMX, 2017). Según el Inventario de emisiones año base 2014 de la ZMVM, las PMs son de los contaminantes que superan las normas de salud de forma recurrente. Además, el PROAIRE 2011-2020 menciona que en la ZMVM la mayor parte de las PM_{2.5} que se encuentran suspendidas en la atmósfera son de origen secundario, mientras que las emisiones anuales corresponden a casi 13,000 toneladas de PM_{2.5}. La Figura 2 muestra la contribución de emisiones para PM_{2.5} por jurisdicción con sus principales fuentes de emisión.

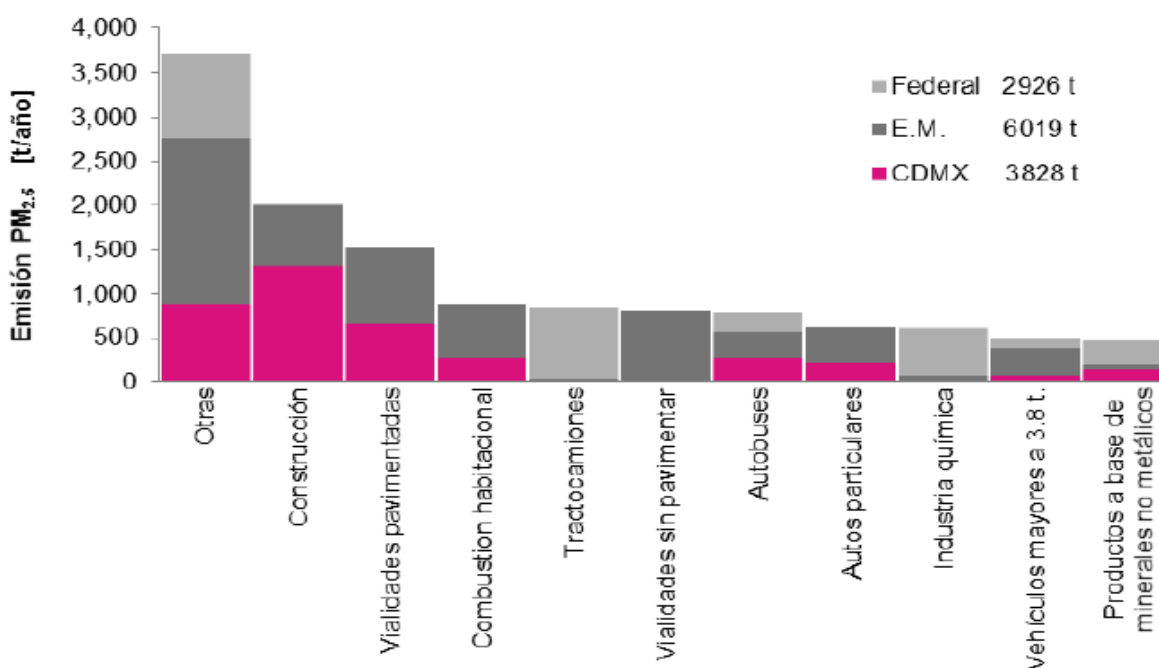


Figura 2. Principales categorías emisoras de PM_{2.5} por jurisdicción (SEDEMA-CDMX, 2016).

La Figura 2 muestra que las actividades de construcción y las vialidades pavimentadas son las principales fuentes de emisión de PM_{2.5} contribuyendo con el 16 % y 12 % respectivamente (SEDEMA-CDMX, 2016). Por su parte, la Figura 3 muestra que las zonas de mayores emisiones de PM_{2.5} en la ZMVM son los

municipios conurbados del Estado de México, lo que coincide con una alta densidad de población.

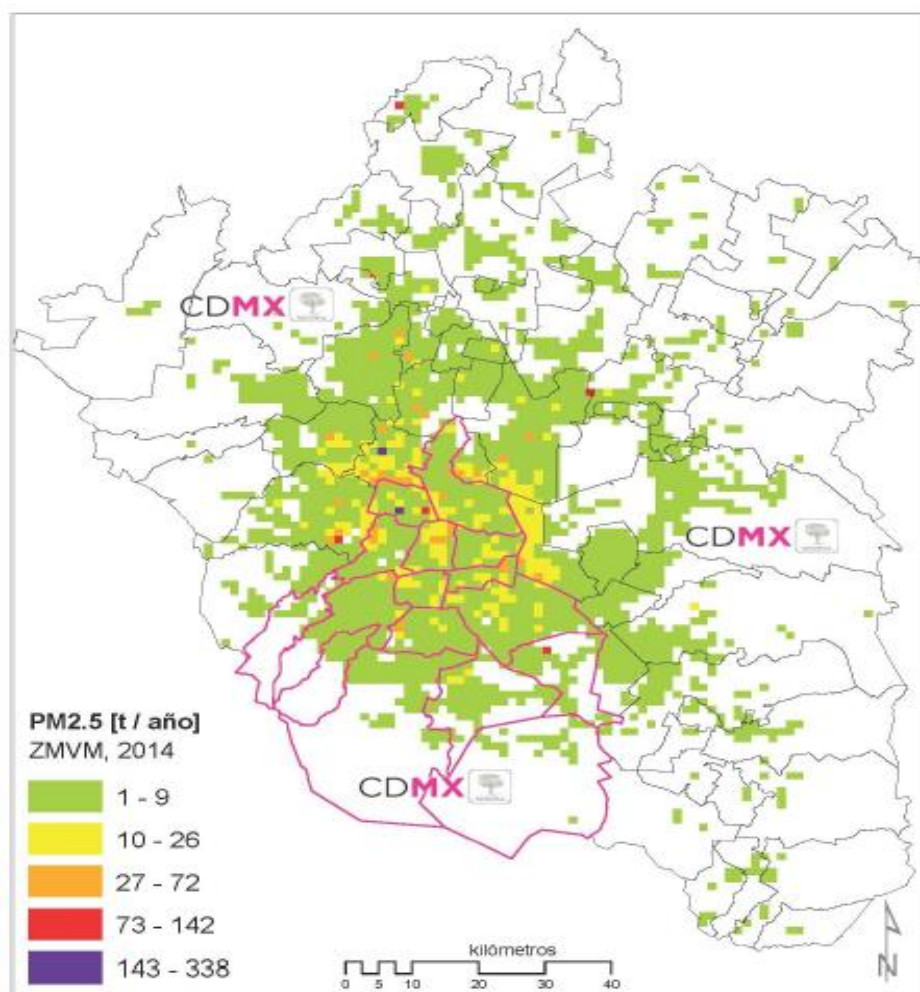


Figura 3. Distribución espacial de la emisión de $PM_{2.5}$ en la ZMVM para el año base 2014 (SEDEMA-CDMX, 2016).

Los niveles de concentración de PM en el ambiente están directamente relacionados con las condiciones meteorológicas, por lo cual, para su evaluación en la ZMVM se han definido las denominadas temporada seca fría, seca caliente y la temporada húmeda. La temporada seca fría está comprendida por los meses de noviembre, diciembre, enero y febrero. La temporada seca caliente corresponde a los meses de marzo a junio, y la temporada húmeda o de lluvias se presenta de junio a noviembre (SEDEMA-CDMX, 2017).

La Figura 4 muestra que los mayores niveles en el ambiente de $PM_{2.5}$ coinciden con los meses de las temporadas seca-caliente y seca-fría, marzo-abril y noviembre-diciembre, respectivamente, lo cual es provocado por un incremento en la intensidad fotoquímica en la atmósfera y por las condiciones meteorológicas que son favorables para la estabilidad atmosférica (SEDEMA-CDMX, 2017). Por el contrario, durante la temporada de lluvias la reducción en la concentración de precursores y la disminución en la intensidad de la radiación solar reducen la concentración de $PM_{2.5}$, además, la humedad del suelo evita la resuspensión del polvo, mientras que la humedad del aire contribuye a la remoción de las partículas a través de procesos de deposición húmeda (SEDEMA-CDMX, 2017).

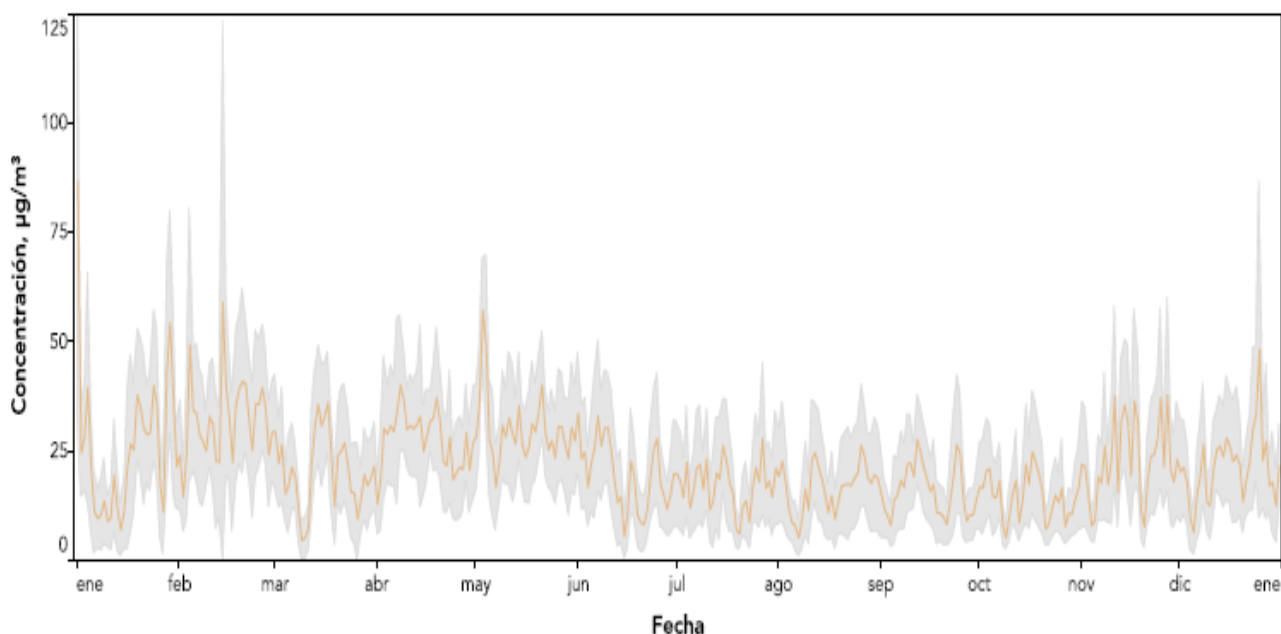


Figura 4. Concentraciones promedio diarias de $PM_{2.5}$ durante el año 2016. La línea continua naranja muestra el promedio diario, y la región gris corresponde a una desviación estándar alrededor de la media (SEDEMA-CDMX, 2017).

Para evaluar la exposición personal a $PM_{2.5}$ es importante contar con información de los niveles en el ambiente de $PM_{2.5}$ por horas y días de la semana. La Figura 5 muestra el perfil horario y semanal promedio de las concentraciones ambiente de $PM_{2.5}$ en la ZMVM en el año 2016. En la Figura 5, la caja representa el rango intercuartil (Q1 y Q3), la línea en el interior de la caja corresponde a la mediana (Q2), los extremos de los bigotes indican 1.5 veces el rango intercuartil (RIQ) y la

línea roja corresponde a la media. La gráfica horaria muestra que las $PM_{2.5}$ presentan una distribución unimodal durante el día, con un máximo entre las 10:00 y las 12:00 horas (tiempo local). En cuanto al comportamiento por día de la semana, los promedios de las concentraciones de $PM_{2.5}$ no muestran variaciones significativas, aunque los valores máximos son observados para el día el viernes.

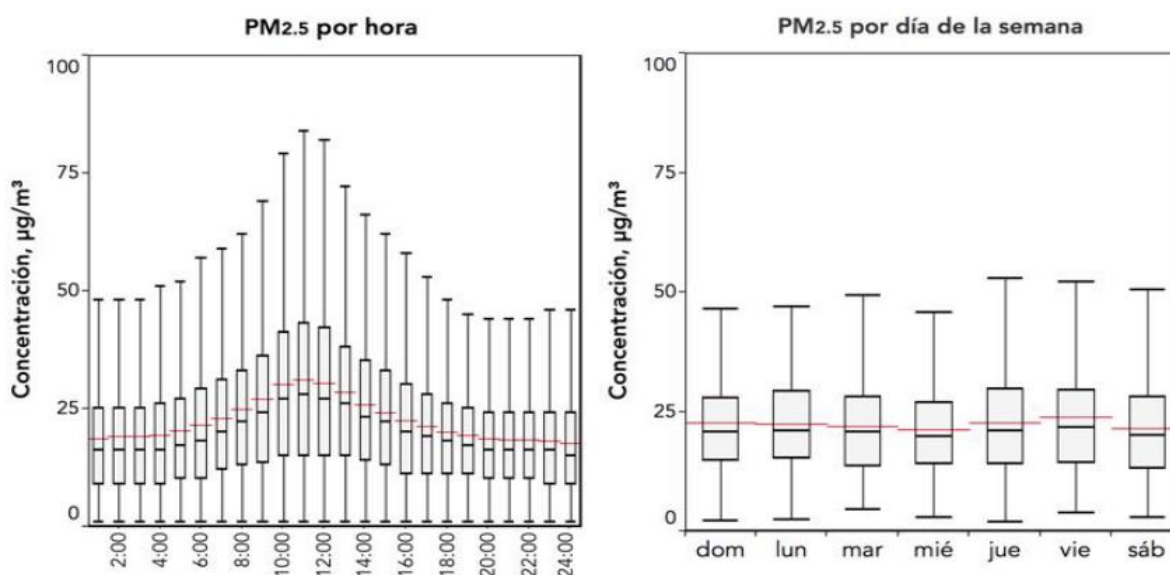


Figura 5. Perfil de horario de las concentraciones ambiente de $PM_{2.5}$ (izquierda) y perfil semanal (derecha) (SEDEMA-CDMX, 2017).

Para evaluar y comunicar el estado de la calidad del aire en la ZMVM, se utiliza el Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA), el cual considera la concentración máxima para cada hora de cada contaminante en función de las recomendaciones de las normas de calidad del aire. La escala se organiza en categorías, y cada una se designa con un color para su identificación visual (Figura 6). Las normas utilizan generalmente el valor de 50 en la escala IMECA como indicador para la exposición crónica y el 100 para la exposición aguda (SEDEMA-CDMX, 2017). Por ejemplo, en el año 2016, en 282 días del año (77 %) se registró al menos una hora en que la concentración de las $PM_{2.5}$ superó los 100 puntos IMECA en la ZMVM en por lo menos una estación de monitoreo. De dichas excedencias, 262 días tuvieron una calidad del aire MALA, 19 días calidad MUY MALA y 1 día calidad del aire EXTREMADAMENTE MALA, mientras que sólo 4 días registraron una calidad del aire BUENA (SEDEMA-CDMX, 2017).

CATEGORIA	INTERVALO	MENSAJE	SIGNIFICADO	RECOMENDACIONES
BUENA	0-50	Sin riesgo	La calidad del aire es satisfactoria y existe poco o ningún riesgo para la salud.	Se puede realizar cualquier actividad al aire libre.
REGULAR	51-100	Aceptable	La calidad del aire es aceptable, sin embargo, en el caso de algunos contaminantes, las personas que son inusualmente sensibles, pueden presentar síntomas moderados.	Las personas que son extremadamente sensibles a la contaminación deben considerar limitar los esfuerzos prolongados al aire libre.
MALA	101-150	Dañina a la salud de los grupos sensibles	Quienes pertenecen a los grupos sensibles pueden experimentar efectos en la salud. El público en general usualmente no es afectado.	Los niños, adultos mayores, personas que realizan actividad física intensa o con enfermedades respiratorias y cardiovasculares, deben limitar los esfuerzos prolongados al aire libre.
MUY MALA	151-200	Dañina a la salud	Todos pueden experimentar efectos en la salud, quienes pertenecen a los grupos sensibles pueden experimentar efectos graves en la salud.	Los niños, adultos mayores, personas que realizan actividad física intensa o con enfermedades respiratorias y cardiovasculares, deben evitar el esfuerzo prolongado al aire libre. La población en general debe limitar el esfuerzo prolongado al aire libre.
EXTREMADAMENTE MALA	>200	Muy dañina a la salud	Representa una condición de emergencia. Toda la población tiene probabilidades de ser afectada.	La población en general debe suspender los esfuerzos al aire libre.

Figura 6. Categorías del Índice Metropolitano de Calidad del Aire (SEDEMA-CDMX, 2017).

1.5 PM_{2.5} y sus efectos en la salud

Los efectos en la salud por PM documentados son amplios, y en particular, afectan a los sistemas respiratorio y cardiovascular. Una vez que el PM ha entrado al tracto respiratorio, puede acumularse en diferentes sitios dentro del aparato respiratorio dependiendo de su tamaño (Falcon-Rodríguez, Osornio-Vargas, Sada-Ovalle, & Segura-Medina, 2016). La Figura 7 muestra que por ejemplo, las PM₁₀ pueden penetrar hasta la zona traqueobronquial, mientras que las PM_{2.5} pueden penetrar hasta los alvéolos pulmonares (PROAIRE-CDMX, 2002). Aunque la salud de toda la población puede ser afectada por el contacto y exposición al PM y en particular a PM_{2.5}, la susceptibilidad varía con el estado de salud de la población y/o la edad. Así, los infantes menores de 5 años, los adultos mayores de 65 años y las personas

con padecimientos previos, son los grupos de mayor susceptibilidad al contacto y exposición a PM (SSA, 2014).

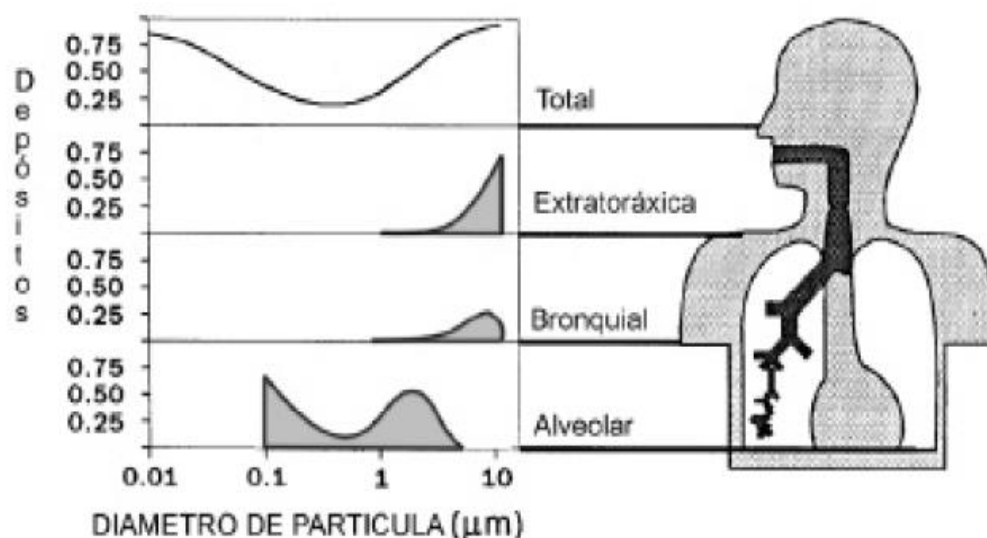


Figura 7. Acumulación de PM en el aparato respiratorio según su diámetro aerodinámico (PROAIRE-CDMX, 2002).

En adultos, la función pulmonar se correlaciona negativamente con la exposición a contaminantes atmosféricos, lo que se ha confirmado en estudios que han mostrado reducciones en el daño pulmonar en respuesta a mejoras en la calidad del aire (Friedman, Powell, Hutwagner, L. Graham, & Teague, 2001). También se ha documentado que las personas con enfermedades preexistentes como la enfermedad pulmonar obstructiva crónica (COPD), enfermedad cardíaca congestiva, miocardio previo infarto o diabetes pueden estar en mayor riesgo de exacerbación aguda en días de alta concentración de PM, en particular de $\text{PM}_{2.5}$ (Peters, 2005).

En los Estados Unidos, la American Cancer Society reportó que a largo plazo, la mortalidad a causa de exposición a PM es significativamente mayor por $\text{PM}_{2.5}$ que por PM_{10} (Pope III, y otros, 2002). En el mismo sentido, en un estudio realizado en Barcelona por Ostro et al. (2011) observaron asociaciones significativas entre las causas y la mortalidad cardiovascular por contacto y exposición con $\text{PM}_{2.5}$ de fuentes vehiculares y resuspensión, así como con PM de origen secundario (sulfatos

y compuestos orgánicos). Los metales componentes del PM también han mostrado ser importantes para el desarrollo de enfermedad pulmonar y cardiovascular en seres humanos (Schwarze, y otros, 2006). En una revisión de los efectos de los metales en PM se identificó al Ni y V como los influyentes en cambios en la frecuencia cardíaca aguda y aumento de la mortalidad a corto plazo, aunque metales como el Pb y Zn también afectan la salud respiratoria en menor medida (Chen & Lippmann, 2009).

En México, la SSA ha reportado que el mayor impacto en la salud por PM, es originado por compuestos altamente tóxicos y carcinogénicos como el carbón elemental, compuestos orgánicos (especialmente los hidrocarburos aromáticos policíclicos), sulfatos, nitratos y determinados metales (arsénico, cadmio, fierro, zinc y níquel). Existe también evidencia que muestra que el PM puede alterar la actividad de enzimas antioxidantes, favoreciendo el estado de estrés oxidativo que daña a biomoléculas como ADN, lípidos y proteínas (SSA, 2014). Además, es posible que las PM_{2.5} puedan causar cáncer de pulmón independiente de la presencia de carcinógenos conocidos y causar la mortalidad post-neonatal (NOM-025-SSA1-2014). Por lo cual, conocer los niveles de exposición de la población a PM_{2.5} en la ZMVM puede ayudar a reducir los efectos en la salud ya mencionados, mediante el diseño de estrategias de mitigación de la exposición.

1.6 Regulación nacional e internacional de los niveles ambiente de PM

La exposición a contaminantes atmosféricos como el PM_{2.5} se ha asociado con diferentes padecimientos en la salud humana y la magnitud de los efectos depende de las concentraciones que se encuentran en el aire, de la dosis que se inhala, del tiempo y la frecuencia de exposición, así como de las características de la población expuesta (SSA, 2014). Por tal motivo y con el objetivo de prevenir los efectos negativos de la exposición a contaminantes atmosféricos en la salud humana, el Estado Mexicano reconoce en el Artículo 4 constitucional el derecho de toda persona a la protección de su salud, así como el derecho a un medio ambiente sano para su desarrollo y bienestar.

En este sentido, los artículos 116 y 118 de la Ley General de Salud señalan que las autoridades sanitarias establecerán las normas, tomarán las medidas y realizarán las actividades tendientes a la protección de la salud humana ante los riesgos y daños dependientes de las condiciones del ambiente. Para tal efecto, corresponde a la dependencia del Ejecutivo Federal, determinar los valores de concentración máxima permisible para el ser humano de contaminantes en el ambiente, los cuales que encuentran establecidos en las normas oficiales mexicanas (NOMs) de salud. Los límites máximos permisibles de contaminantes en el aire ambiente establecidos en las NOMs tienen la finalidad de garantizar la protección de la salud de la población a corto y largo plazo. La Tabla 2 presenta el listado de las NOMs vigentes para PM en México, además de las fechas de última actualización.

Tabla 2. Listado de las Normas Oficiales Mexicanas de Salud Ambiental vigentes para la regulación de los niveles ambiente de PM.

Contaminante	Norma Oficial Mexicana	Valor límite	Última actualización
Partículas menores a 10 micrómetros (PM ₁₀)	NOM-025-SSA-1-2014	75 $\mu\text{g m}^{-3}$ promedio de 24 horas 40 $\mu\text{g m}^{-3}$ promedio anual	20 de Agosto de 2014
Partículas menores a 2.5 micrómetros (PM _{2.5})	NOM-025-SSA-1-2014	45 $\mu\text{g m}^{-3}$ promedio de 24 horas 12 $\mu\text{g m}^{-3}$ promedio anual	20 de Agosto de 2014

En la ZMVM, las PM_{2.5} son las responsables del mayor número de días con una calidad del aire desfavorable después del O₃. El reporte Anual de Calidad del Aire 2016 indica que las concentraciones máximas para los promedios de 24 horas y anual fueron de 96 y 24 $\mu\text{g m}^{-3}$, respectivamente, superando los límites de la NOM, los valores guía de la OMS y el estándar de la US EPA (Tabla 3). En este sentido, estudios epidemiológicos, toxicológicos y de exposición en seres humanos sugieren que los niveles actuales de PM_{2.5} que se encuentran por encima de los establecidos por las normativas nacional e internacional implican riesgos potenciales para la salud (NOM-025-SSA1-2014).

Tabla 3. Comparación de los límites máximos permisibles de los niveles ambiente de PM_{2.5} establecidos en la NOM-025-SSA1-2014, con los establecidos por la U.S. EPA y los valores guía de la OMS.

	NOM		OMS		US EPA	
	Máximo 24 h	Promedio anual	Percentil 99 24 h	Promedio anual	Promedio trianual del 2° máximo	Promedio trianual
Límite permisible	45 µg m ⁻³	12 µg m ⁻³	25 µg m ⁻³	10 µg m ⁻³	35 µg m ⁻³	12 µg m ⁻³
ZMVM	96 µg m ⁻³	24.2 µg m ⁻³	96 µg m ⁻³	24.2 µg m ⁻³	52 µg m ⁻³	26 µg m ⁻³
Ciudad de México	85 µg m ⁻³	21.5 µg m ⁻³	85 µg m ⁻³	21.5 µg m ⁻³	42 µg m ⁻³	21 µg m ⁻³
Área conurbada	96 µg m ⁻³	24.2 µg m ⁻³	96 µg m ⁻³	24.2 µg m ⁻³	52 µg m ⁻³	26 µg m ⁻³

**Se indican en color rojo aquellas concentraciones que son superiores a los valores límite.

La actualización de la normatividad aplicable a contaminantes atmosféricos debe basarse en el principio precautorio y en la información científica disponible. No obstante, el monitoreo de PM_{2.5} en México aún presenta deficiencias y en algunas ciudades no es realizado. Además, por razones ambientales y de salud resulta importante contar con información de la concentración de PM_{2.5} a nivel de calle con el fin de aportar ideas para minimizar la exposición de la población. Por lo anterior, el presente estudio busca proveer información de los niveles de exposición que ayuden a un mejor diseño de dicha normatividad y que pueda ser usada también para diseñar estrategias de mitigación de la exposición.

1.7 El transporte de la población en la ZMVM

La congestión vial y el consecuente incremento de emisiones por los vehículos automotores es un problema actual de la ZMVM derivado del incremento del parque vehicular. Para mitigar los efectos de dicho incremento, es necesario realizar una planeación y modificación de la infraestructura vial y, diseñar políticas públicas y proyectos que favorezcan un transporte sustentable. No obstante, de acuerdo con la Encuesta Origen Destino (EOD) del año 2017 para viajes realizados en la ZMVM,

de los 19.38 millones de personas de 6 años en adelante, 7.96 millones de personas viajan diariamente en transporte público (Tabla 4). Por lo cual, evaluar la calidad del aire y exposición personal a contaminantes, en particular a PM_{2.5}, en medios de transporte público que usa la mayoría de la población puede servir para proveer información de los niveles a que esta está expuesta diariamente.

Tabla 4. Población de 6 años y más que realizó viajes en un día entre semana, por tipo y modo de transporte utilizado en al menos uno de los tramos de su(s) viaje(s) según sexo. (INEGI. EOD, 2017).

Tipo y modo de transporte	Total		Sexo			
	Millones de personas ¹	%	Mujeres	%	Hombres	%
ZMVM	15.62		7.91		7.72	
Transporte público²	7.96	50.9	3.95	49.9	4.01	52.0
Colectivo	6.09	76.6	2.96	75.1	3.13	78.0
Taxi (calle, sitio o aplicación)	1.07	13.4	0.68	17.3	0.39	9.7
Metro	2.39	30.0	1.01	25.5	1.38	34.4
Metrobús o Mexibús	0.62	7.8	0.30	7.5	0.32	8.0
Otro transporte público	1.20	15.1	0.58	14.7	0.62	15.5
Transporte privado³	3.48	22.3	1.44	18.2	2.04	26.4
Automóvil	3.15	90.5	1.32	91.6	1.83	89.8
Motocicleta	0.18	5.1	0.04	3.0	0.13	6.5
Transporte escolar	0.16	4.5	0.08	5.6	0.08	3.7
Transporte personal	0.02	0.6	0.01	0.7	0.01	0.6
Caminar en la calle	10.30	65.9	5.65	71.4	4.65	60.3
Bicicleta⁴	0.34	2.2	0.09	1.1	0.26	3.3
Otro⁵	0.02	0.2	0.01	0.1	0.02	0.2

¹La suma por modo de transporte utilizado, puede ser mayor que su total correspondiente, debido a que una persona puede emplear más de un modo de transporte.

²El porcentaje de los transportes se obtiene con respecto al total de transporte público.

³El porcentaje de los transportes se obtiene con respecto al total de transporte privado.

⁴Debido a la forma en que se captó la bicicleta, no es posible distinguir si es transporte público o privado.

⁵En la categoría "Otro" se incluye trajinera y lancha, entre otros.

De los diferentes medios de transporte público, el Metro ocupa el segundo lugar en frecuencia de uso y el Metrobús el cuarto lugar (Figura 8), siendo importante considerarlos como objeto de estudio al ser de los más demandados y contar con rutas que cruzan completamente gran parte de la ZMVM. También, la EOD (2017) reporta que los horarios en que la población en la ZMVM realizan más viajes son entre 07:00 y 07:59, a las 13:00 y a las 18:00 hora local (Figura 9). Por ello, el considerar los transportes empleados con mayor frecuencia, los días de mayor uso y los horarios más demandados permitirá obtener información de la exposición poblacional a contaminantes que puede ser usada para la planeación de estrategias de mitigación.

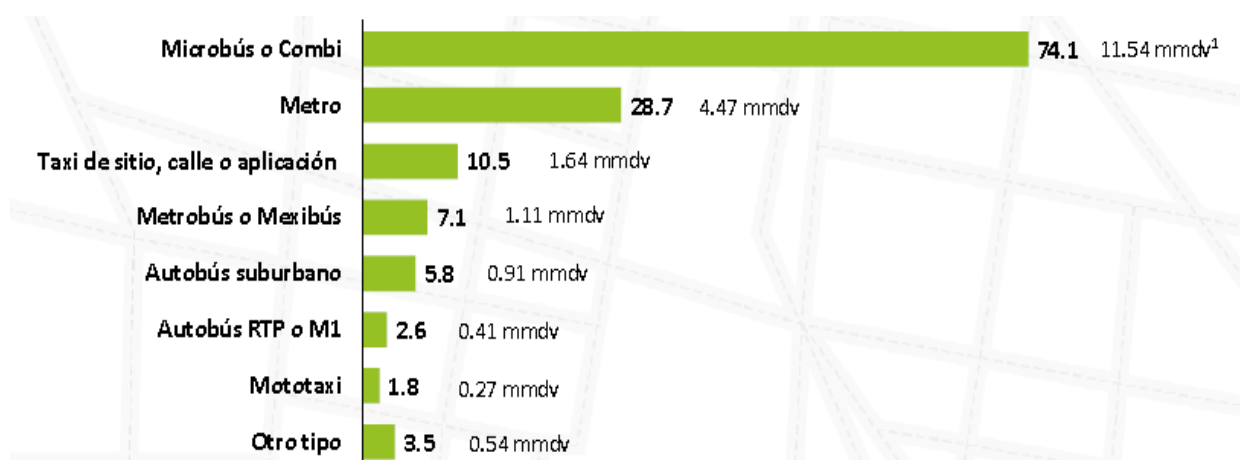


Figura 8. Distribución porcentual de viajes realizados un día entre semana por la población de 6 años y más en transporte público, según principales medios de transporte utilizado (INEGI. EDO, 2017).

¹mmdv= millones de viajes

Nota: Otro tipo considera tren suburbano, trolebús, tren ligero, bicitaxi y MEXICABLE. La suma de la utilización de los medios de transporte es mayor que el 100%, porque en un viaje la persona puede utilizar más de un medio de transporte.

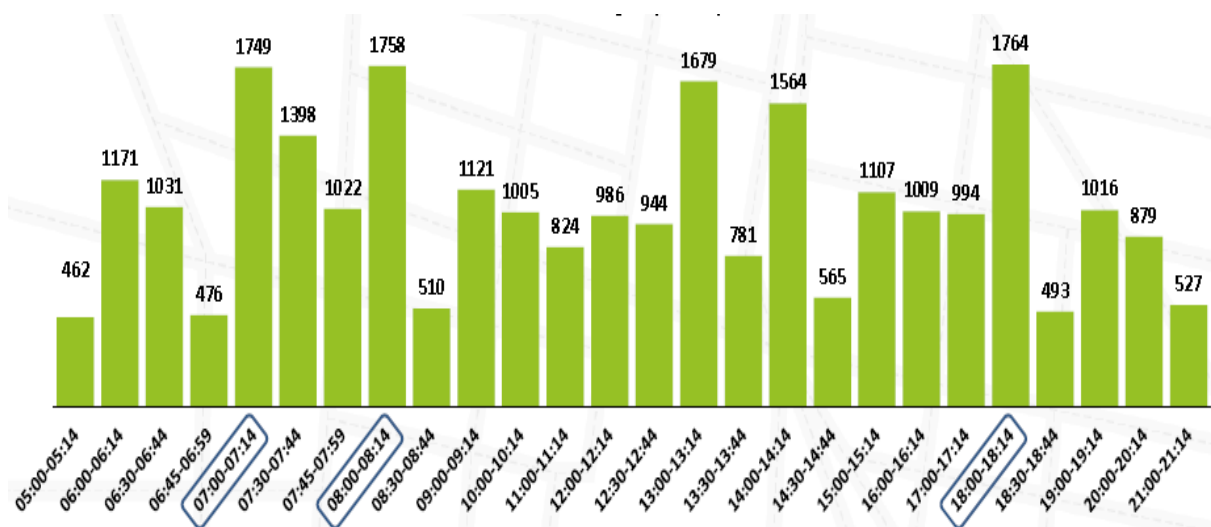


Figura 9. Número de viajes realizados un día entre semana por la población de 6 años y más según hora inicio del viaje en miles (INEGI-EOD, 2017).

Estimaciones sugieren que para el año 2020 se realizarán un total de 28.3 millones de viajes en día laborable, de los cuales el 61.5 % corresponderán a la Ciudad de México y el 38. 5% a los municipios conurbados del Estado de México. Esto remarca la necesidad de contar con información de la exposición a contaminantes durante los viajes diarios en la ZMVM.

1.8 Antecedentes de la exposición a PM_{2.5} en medios de transporte

La exposición personal a contaminantes durante el traslado diario representa un riesgo significativo para la salud de la población. Aunque dicha exposición en diversos medios de transporte (microambientes) representa entre 1-6 % del tiempo en una escala diaria (Smith, y otros, 2016), en grandes zonas metropolitanas dicha exposición puede verse incrementada notablemente. Por ejemplo, en la ZMVM en promedio la población requiere en promedio de una hora para llegar al trabajo y 3/4 de hora para regresar al hogar. Dichos trayectos corresponden a un tiempo promedio de viaje de 56 min y representan alrededor de 14 h por semana experimentados en microambientes de transporte (INEGI-EOD, 2017). Por lo tanto, incrementos en tiempos de traslado pueden resultar en incrementos en la

exposición a contaminantes, en particular a $PM_{2.5}$ lo que es significativo para la salud pública.

A la fecha, se han realizado diversos estudios sobre exposición personal a $PM_{2.5}$ en microambientes de transporte principalmente en zonas urbanas de Norte América y Europa. Por ejemplo, en el centro de Londres, Reino Unido, Adams et al. (2001) observaron niveles de exposición a $PM_{2.5}$ de 7.9 a 97.4 $\mu g\ m^{-3}$ en autobús, de 13.3 a 68.7 $\mu g\ m^{-3}$ en bicicleta, de 15.1 a 76.9 $\mu g\ m^{-3}$ en coche y de 105.3 a 371.2 $\mu g\ m^{-3}$ en el metro, con promedios similares para el transporte por carretera y en metro hasta 8 veces superiores a los superficiales. Similarmente, Okokon et al. (2017) estudiaron la exposición a partículas en bicicletas, autobuses y automóviles en Helsinki en Finlandia, Rotterdam en los Países Bajos y Tesalónica en Grecia. Ellos reportaron los niveles más altos de $PM_{2.5}$ de 85 $\mu g\ m^{-3}$ y de PM_{10} de 131 $\mu g\ m^{-3}$ en el autobús en Tesalónica, y de forma global las concentraciones de PM más altas para ciclistas seguidas del autobús para las 3 ciudades.

En Santa Mónica, California, Quiros et al. (2013) evaluaron de manera simultánea exposición en peatones y ciclistas, reportando concentraciones medias de partículas ultrafinas 70 % más bajas por las tardes y noches comparadas con la mañana y exposiciones medias a $PM_{2.5}$ de 2 a 15 $\mu g\ m^{-3}$. Ellos también reportaron que la conducción con ventanas abiertas resultaba en 2 veces más exposición a partículas comparada con ventanas cerradas, mientras que al transitar en bicicleta y caminar resultaba 15 y 30 veces una exposición superior. No obstante, en países en desarrollo económico se han realizado pocos estudios sobre los niveles de exposición a contaminantes en microambientes de transporte.

En México, se han realizado estudios de exposición a contaminantes sólo en la ZMVM, por ejemplo, en el marco del proyecto de “Evaluación de los beneficios en la exposición personal de pasajeros por la instrumentación de cambios en el transporte público” se midieron la exposición personal a $PM_{2.5}$ y PM_{10} , CO, y benceno en la Av. Insurgentes en microbús y autobús en verano de 2004, y en Metrobús (en otoño de 2005). Las medianas de exposición para $PM_{2.5}$ y PM_{10} fueron en microbús de 152.4 y 196.3 $\mu g\ m^{-3}$, en autobús de 128.8 y 202.3 $\mu g\ m^{-3}$ y, de 98.7

y $183.1 \mu\text{g m}^{-3}$ en el Metrobús, todas respectivamente. Dichos resultados indicaron que el transporte en Metrobús comparado con autobuses y microbuses resultaba con una disminución notable en la exposición personal (INE & CTS, 2006).

Vallejo et al. (2004) estudió la exposición personal de residentes de la ZMVM a $\text{PM}_{2.5}$ durante sus actividades diarias en microambientes interiores y exteriores, considerando exposición matutina y vespertina, actividades interiores y exteriores, y ubicación geográfica. Ellos observaron una concentración media exterior de $\text{PM}_{2.5}$ de $89.50 \mu\text{g m}^{-3}$ mayor que en interiores de $67.55 \mu\text{g m}^{-3}$, mientras que las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ en la mañana fueron más elevadas que en la tarde. Además, en el microambiente interior, la mayor concentración de $106.2 \mu\text{g m}^{-3}$ fue en el metro y la más baja de $53.1 \mu\text{g m}^{-3}$ en el hogar, mientras que en el exterior los niveles más altos de $99.9 \mu\text{g m}^{-3}$, se registraron en autobús y los menores de $64.9 \mu\text{g m}^{-3}$ en el automóvil. Finalmente, las zonas geográficas con las mayores y menores concentraciones fueron el centro y noreste de la ZMVM, respectivamente. Tales resultados confirman que en la ZMVM la exposición personal a $\text{PM}_{2.5}$ varía en función de la hora del día, las actividades diarias y los microambientes experimentados por la población (Vallejo, y otros, 2004), por lo cual contar con información de dichos niveles puede permitir diseñar estrategias para reducirla.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Evaluar los niveles de exposición personal a $PM_{2.5}$ en microambientes de transporte que transiten de norte a sur y de este a oeste dentro de la ZMVM.

2.2 Objetivos particulares

- Obtener perfiles espacio-temporales de la concentración ambiente de $PM_{2.5}$ en las líneas 1 y 3 del metro y en las líneas 1 y 2 del Metrobús.
- Medir los niveles de exposición personal a $PM_{2.5}$ en las líneas de transporte seleccionadas en las temporadas seca fría y seca caliente típicas de la ZMVM.
- Comparar los niveles de exposición entre ambas campañas de muestreo realizadas, entre los medios de transporte metro y Metrobús, entre los horarios de medición y entre las líneas empleadas.

3 METODOLOGIA

3.1 Diseño experimental

Durante el presente trabajo se realizaron campañas de muestreo para medir los niveles de exposición personal a $PM_{2.5}$ en las líneas 1 y 3 del sistema de transporte colectivo metro y en las líneas 1 y 2 del sistema Metrobús. Las campañas de muestreo se realizaron durante las temporadas seca fría (En Octubre y Noviembre del 2017) y seca caliente (En Abril del 2018) con la finalidad de tener representatividad temporal en la exposición a $PM_{2.5}$. Los muestreos se realizaron en días miércoles con la finalidad de descartar efectos del fin de semana en la exposición personal. La Tabla 5 presenta el calendario de muestreos realizados durante el presente estudio.

Tabla 5. Fechas de muestreo de $PM_{2.5}$ por temporada y medio de transporte.

Temporada	Transporte	Línea	Fecha de muestreo
Seca fría	Metro	3	11 de Octubre del 2017
		1	18 de Octubre del 2017
	Metrobús	1	25 de Octubre del 2017
		2	08 de Noviembre del 2017
Seca caliente	Metro	3	04 de Abril del 2018
		1	11 de Abril del 2018
	Metrobús	1	18 de Abril del 2018
		2	25 de Abril del 2018

Se realizaron 3 mediciones en metro para comparar los cambios en la exposición a $PM_{2.5}$ durante el día y 2 viajes en Metrobús en los horarios pico de tráfico vehicular entre 07:30-09:30 y 18:00-20:00, además de realizar mediciones durante la hora de máxima producción secundaria de $PM_{2.5}$ alrededor de las 11:00 CDT. Las mediciones se realizaron a lo largo de líneas completas del Metro y Metrobús y en trayectos con origen sur-norte y oeste-este. La Tabla 6 muestra los horarios en los que se realizaron los muestreos.

Tabla 6. Horarios de medición de los niveles de exposición personal a PM_{2.5} en el Metro y Metrobús.

Transporte	Viaje	Horario*
Metro	Mañana	7:30 -9:30 CDT
	Medio día	10:15-12:30 CDT
	Tarde	18:00-21:00 CDT
Metrobús	Mañana	7:30-11:30 CDT
	Tarde	18:00-22:00 CDT

**Los horarios de medición presentaron ligeras variaciones según el medio transporte, tráfico, espera en el andén y detenciones del flujo vehicular en el caso del Metrobús. Se respetaron lo mayor posible las horas de inicio aquí presentadas en los diferentes medios de transportes y en los diferentes viajes del día.*

En el metro, las mediciones se realizaron en el cuarto vagón del convoy al lado y al frente de la segunda puerta. En el Metrobús, para los modelos de dos y tres vagones la medición se realizó en el último vagón, en la parte intermedia e igualmente la ubicación fue al lado y al frente de la puerta tal como se muestra en la Figura 10.



Figura 10. Ubicación de las zonas de medición de la exposición a PM_{2.5} en metro en el panel izquierdo y Metrobús en el panel derecho.

Con la finalidad de contar con un registro de las características del transporte y condiciones durante los muestreos, se registró en una bitácora la marca y modelo de los camiones en que se viajó (ver Anexo XI), además se anotaron las fechas de muestreo, línea y trayecto realizado, y las estaciones con la hora exacta de apertura y cierre de puertas con sus respectivas observaciones del lugar. Al término de cada trayecto se apagaron todos los equipos usados. Posterior a las campañas de muestreo, se descargaron y respaldaron los datos obtenidos en archivos organizados por nombre y fecha (Figura 11).

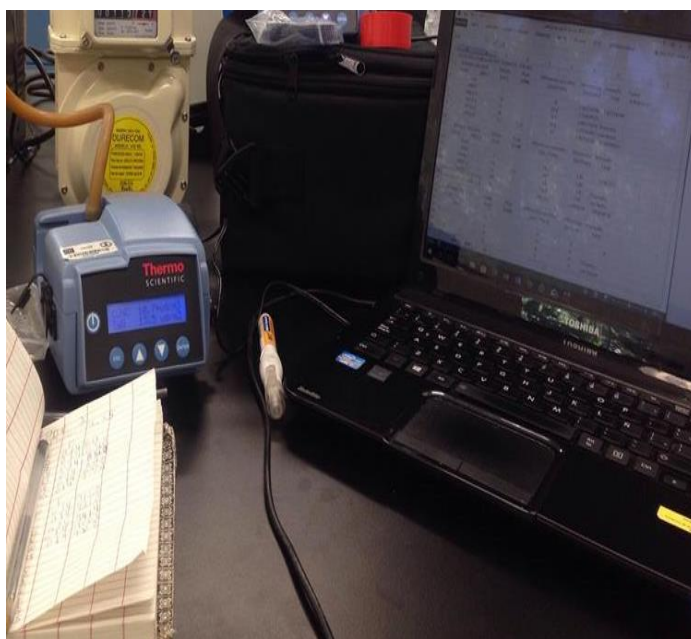


Figura 11. Descarga y respaldo los datos recolectados durante las campañas de medición.

La Figura 12 muestra la metodología de trabajo empleada para la medición de los niveles de exposición personal a PM_{2.5} en microambientes de transporte de la ZMVM.

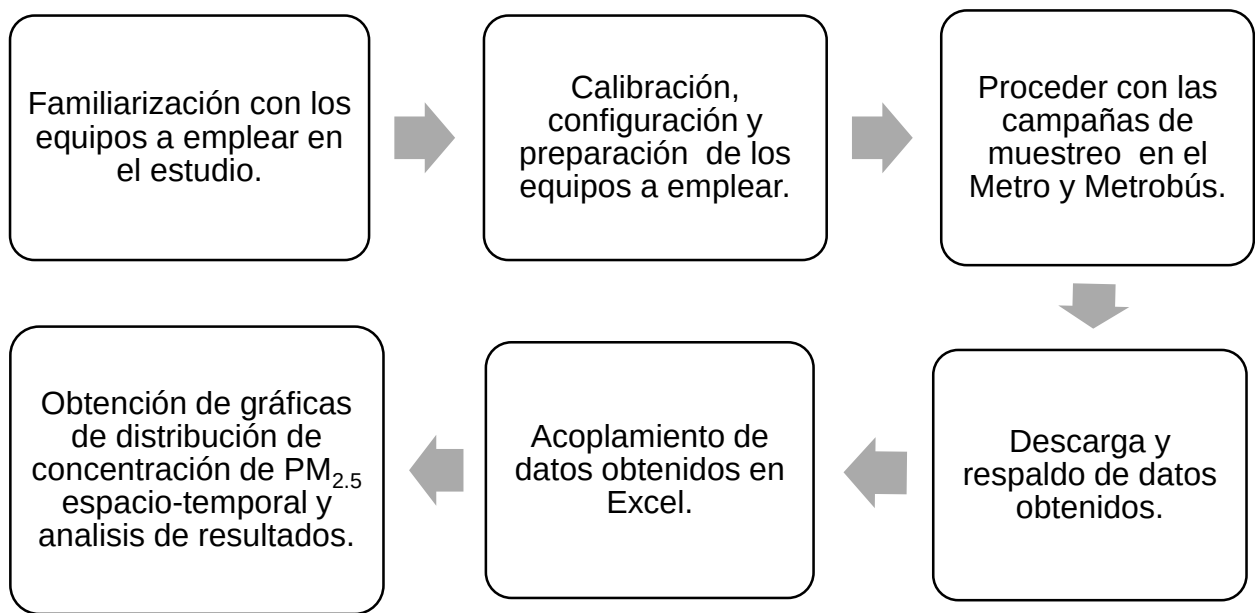


Figura 12. Diagrama de flujo de la metodología de trabajo utilizada para realizar las campañas de monitoreo de la exposición personal a $PM_{2.5}$ en microambientes de transporte y análisis de los datos obtenidos.

3.2 Descripción de la zona de estudio

El presente proyecto se desarrolló en la ZMVM, la cual tiene una superficie aproximada de 3,540 km² con prominencias topográficas aisladas como el Cerro de la Estrella, el Peñón y el Cerro de Chapultepec, entre otros. Su ubicación geográfica y su entorno característico rodeada en gran parte por montañas ejercen una influencia determinante sobre la calidad del aire existente en esta zona. Por ello, la exposición personal a $PM_{2.5}$ se evaluó en medios que permitieran obtener perfiles de su distribución espacial norte-sur y este-oeste en la ZMVM.

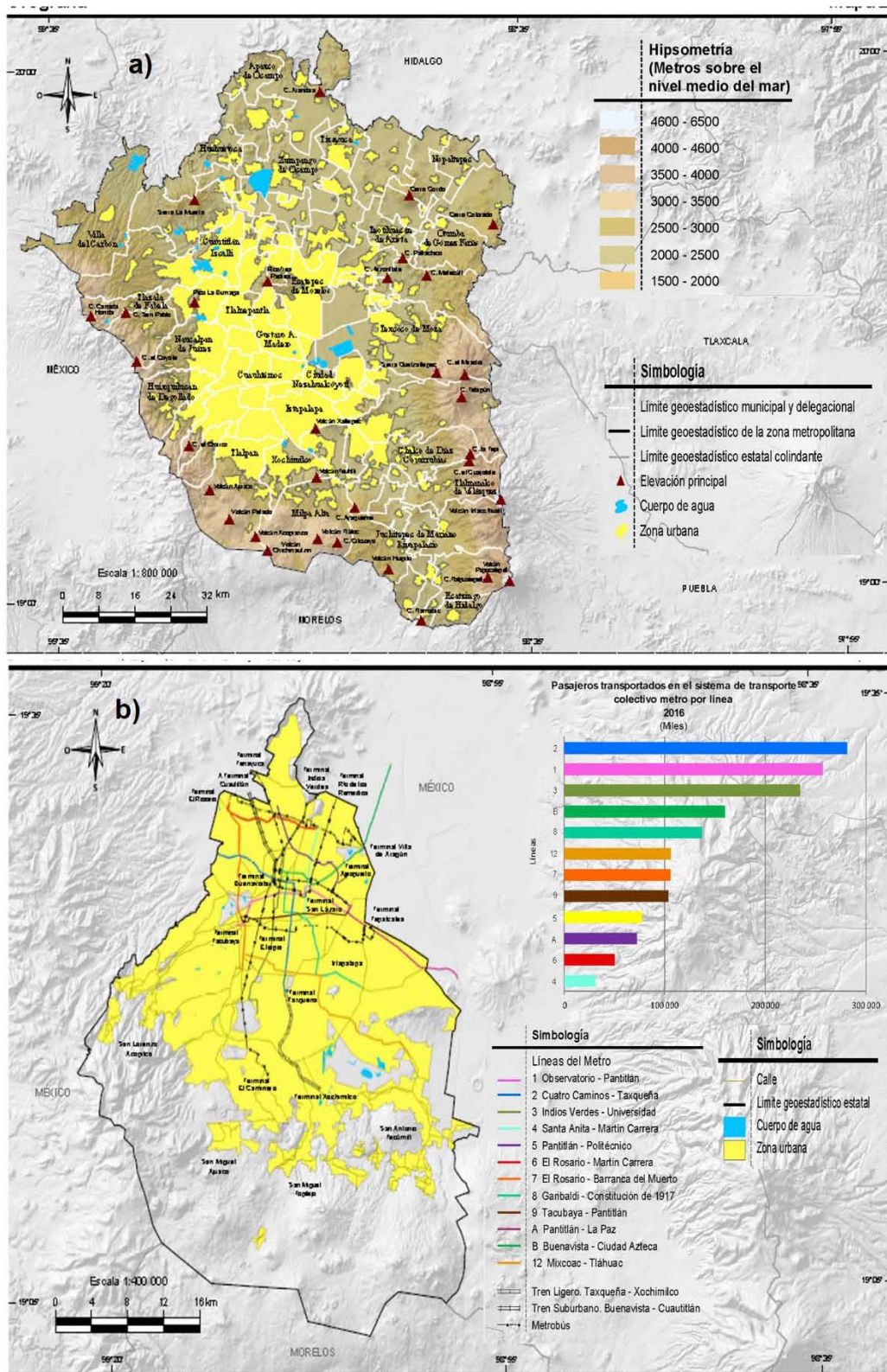


Figura 13. a) Orografía y b) Infraestructura del transporte público en la Zona Metropolitana del Valle de México (Obtenido de INEGI 2015 y 2017).

3.2.1 Metro

El sistema de transporte colectivo Metro de la Ciudad de México es un medio de transporte masivo que responde a una alta demanda de ocupación (SMA, 2008). La red del Metro cuenta con 12 líneas, de las cuales se realizaron mediciones en las líneas 1 y 3. La Línea 1 recorre de Este a Oeste la Ciudad de México, tiene una longitud de 18.8 km y se integra por 20 estaciones, 7 de ellas de correspondencia, 12 de paso y dos terminales, 19 estaciones son subterráneas y una superficial (Fig. 14).



Figura 14. Estaciones de la Línea 1 del Metro (Portal Oficial del STC de CDMX, 2018).

La línea 3 del Metro recorre la Ciudad de México de Norte a Sur, tiene una longitud de 23.6 km y está integrada por 21 estaciones, 6 de ellas de correspondencia, 13 de paso y 2 terminales, 17 estaciones son subterráneas y 4 superficiales (Figura 15).



Figura 15. Estaciones de la Línea 3 del Metro (Portal Oficial del STC de CDMX, 2018).

3.2.2 Metrobús

El Sistema Metrobús es un sistema de transporte masivo que cuenta con 7 líneas, de las cuales en el presente estudio se consideraron las líneas 1 y 2. La línea 1 del Metrobús recorre Av. de los Insurgentes de Norte a Sur, tiene una longitud de 30 km y 47 estaciones con una demanda de 480 mil usuarios por día (Fig. 16) (Portal oficial del metrobús de CDMX, 2018).



Figura 16. Estaciones de la Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México (Portal oficial del metrobús de CDMX, 2018)

La línea 2 del Metrobús recorre la Ciudad de México de Este a Oeste y viceversa a partir del eje 4, tiene una longitud de 20 km, 36 estaciones y una demanda aproximada de 180 mil pasajeros por día (Fig. 17) (Portal oficial del metrobús de CDMX, 2018).



Figura 17. Estaciones de la Línea 2 del Metrobús de la Ciudad de México (Portal oficial del metrobús de CDMX, 2018).

3.3 CAMPAÑAS DE MUESTREO

3.3.1 Instrumentación

Se describen a continuación los equipos utilizados para la medición de los niveles de exposición personal a PM_{2.5} en microambientes de transporte en la ZMVM.

Monitor de aerosoles personal

Para la medición de las concentraciones ambiente de PM_{2.5} a que está expuesta la población se utilizaron tres monitores de aerosoles personal modelo pDR-1500 Thermo Scientific, equipados con control volumétrico activo para proporcionar validación gravimétrica en tiempo real (Fig. 18). El pDR mide partículas suspendidas en líquido o gas con una fotocelda colocada en un ángulo de 90° con respecto a una fuente luminosa (nefelómetro). La densidad de partículas es función de la luz reflejada por las partículas hacia la fotocelda. La cantidad de luz que refleje una determinada densidad de partículas depende de las propiedades de las partículas, tales como su forma, su color y su reflectividad. El pDR incorpora también un sensor de temperatura y de humedad relativa para corrección de las lecturas. Además, tiene capacidad de controlar el flujo volumétrico que se mantiene a través de la retroalimentación digital del sensor de presión barométrica, sensor de temperatura y presión diferencial calibrada.



Figura 18. Nefelómetro pDR-1500 usado para la medición de la concentración de PM_{2.5} en microambientes de transporte de la ZMVM.

Para realizar el muestreo de $PM_{2.5}$ a la altura nasal, se utilizó una manguera conectada al ciclón para partículas $PM_{2.5}$, de silicón no reactivo y pared interna lisa (longitud 0.55 m, d.i. 8/16"). Se verificó en todas las mediciones que dicha manguera no presentara dobleces lo que asegura el flujo de aire calibrado sin variaciones.

Receptor satelital GPS

Se utilizó un receptor satelital modelo GPSmap 60CSx GARMIN, conocido como GPS por sus siglas en inglés (*Global Positioning System*), para georeferenciar las mediciones de $PM_{2.5}$, equipado con sensores de brújula electrónica y un altímetro barométrico que permiten obtener datos de latitud, longitud, altitud y presión de puntos de interés.

Cámara de video

Se usaron dos cámaras de video modelo Ion Air Pro Lite 1011w con capacidad HD de 1080 p con ángulo de visión de 170°, sensor de imagen de 5 megapíxeles y capacidad de hasta 2.5 horas de grabación continua. Las cámaras se utilizaron para la grabación de los trayectos completos en las líneas del Metrobús, que permitan interpretar datos atípicos en los niveles de concentración de $PM_{2.5}$.

3.3.2 Calibración de los monitores personales de $PM_{2.5}$

Los equipos pDR-1500 son calibrados de fábrica usando estándares trazables del Instituto Nacional de Estándares y Pruebas (NIST), para mediciones de concentraciones en masa, temperatura, humedad relativa, presión barométrica, y caudal volumétrico. No obstante, el flujo de operación de la bomba que suministra el aire ambiente a la cámara interna del pDR-1500 se debe calibrar manualmente previamente a cada medición, lo cual se realizó siguiendo el procedimiento descrito a continuación:

Se utilizó un gasómetro comercial como referencia del volumen real que circula a través de la cámara de medición del pDR. El gasómetro se encuentra calibrado para medición del flujo de gas natural, por lo cual los datos obtenidos se ajustan con un

factor de corrección para aire utilizando las densidades de ambos gases como se muestra en la Ecuación 1:

$$K = \sqrt{\frac{D_1}{D_2}} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

Gas	Densidad (kg m ⁻³)
Gas natural (D ₁)	0.78
Aire (D ₂)	1.2050

Así resulta que:

$$K = \sqrt{\frac{0.78}{1.2050}} = 0.805$$

El factor K es multiplicado por el flujo promedio obtenido en la calibración con lo que se obtiene el flujo de aire que pasa por el pDR. Los equipos pDR se calibraron un día previo a las campañas de muestreo. El procedimiento detallado de calibración se describe en el Anexo I y II. La Tabla 7 muestra la calibración del equipo pDR realizada para un flujo de 3.3 litros por minuto en intervalos de 3 min.

Tabla 7. Calibración del equipo pDR a un flujo de 3.3 litros por minuto (LPM) en intervalos de 3 min.

Volumen aire (m ³)	Tiempo (min)	Flujo (LPM)	Diferencias parciales (dm ³ min ⁻¹)	Diferencias (dm ³ min ⁻¹)	Promedio total (dm ³)
72678	0	3.3			4.22
72690.8	3		12.80	4.27	Factor
72703.4	6		12.60	4.20	0.80455137
72716	9		12.60	4.20	Promedio con factor
72728.6	12		12.60	4.20	[dm³]
72741.3	15		12.70	4.23	3.395206781

La Figura 19 muestra las correlaciones para los equipos pDR entre flujos programados y flujos medidos, lo que permitió obtener el valor del flujo al cual se debe programar los equipos pDR para realizar las mediciones a un flujo de aire de 1.5 LPM.

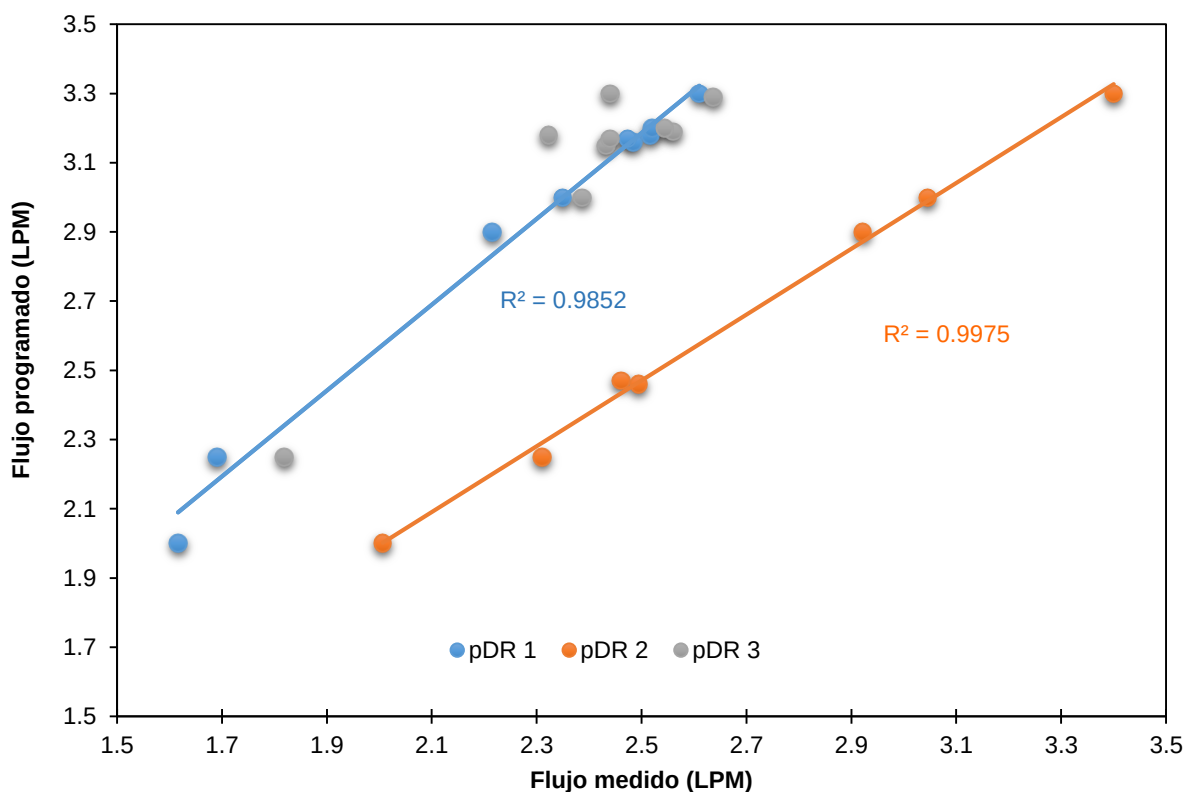


Figura 19. Regresión lineal entre flujos medidos y programadas en los equipos pDRs.

4 RESULTADOS

4.1 Exposición personal a PM_{2.5} en Metro

Siguiendo la metodología de trabajo descrita en la Sección 3 y en el Anexo II, III, IV, V y VI se realizaron dos campañas de muestreo, una en la temporada seca fría del 2017 y otra en la temporada seca caliente del 2018 en el Metro y Metrobús de la Ciudad de México. Durante la temporada seca fría se realizaron 2 mediciones por trayecto por cada horario, mientras que durante la temporada seca caliente se realizaron 3 mediciones por cada trayecto y horario.

En la presente sección se presentan los resultados obtenidos en dichas campañas, así como las variaciones espacio-temporal en concentración de exposición personal a PM_{2.5}. Los resultados se presentan por dirección de viaje Norte-Sur, Este-Oeste y viceversa para los diferentes horarios considerados en el estudio. Se presenta también una comparación de los resultados por horario, trayecto, temporada y medio de transporte, con la finalidad de permitir un mejor análisis e interpretación de los resultados obtenidos.

4.1.1 Metro Línea 1

A continuación, se presentan los resultados de ambas temporadas por trayecto, en los tres diferentes horarios de medición, en el cual los trayectos realizados se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8. Descripción de trayectos realizadas en el Metro línea 1.

Trayecto	Dirección
Ida	De Observatorio a Pantitlán
Regreso	De Pantitlán a Observatorio

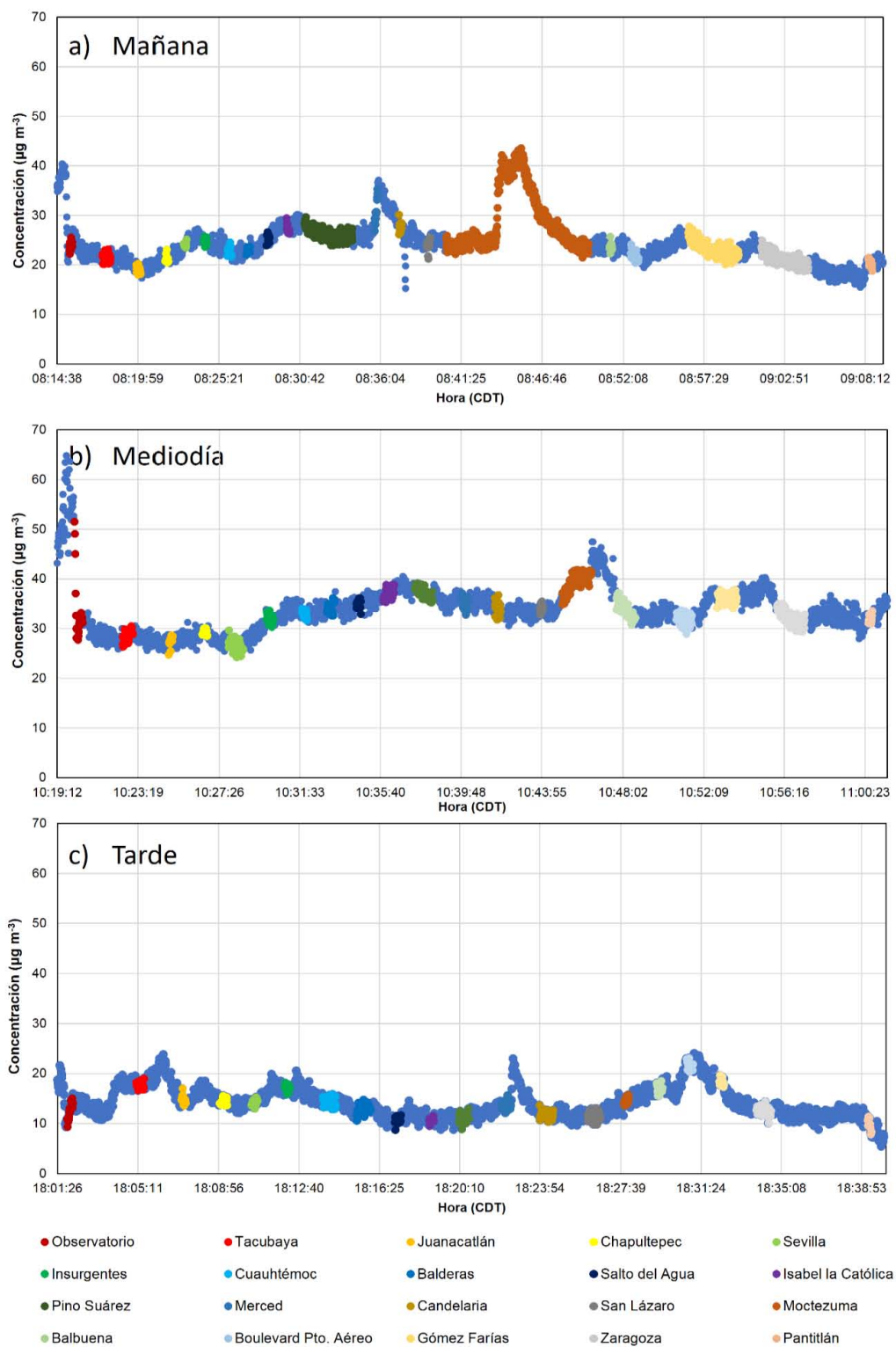


Figura 20. Concentraciones ambiente de $\text{PM}_{2.5}$ observadas en la Línea 1 del Metro en el trayecto de Observatorio-Pantitlán en la temporada seca fría de 2017.

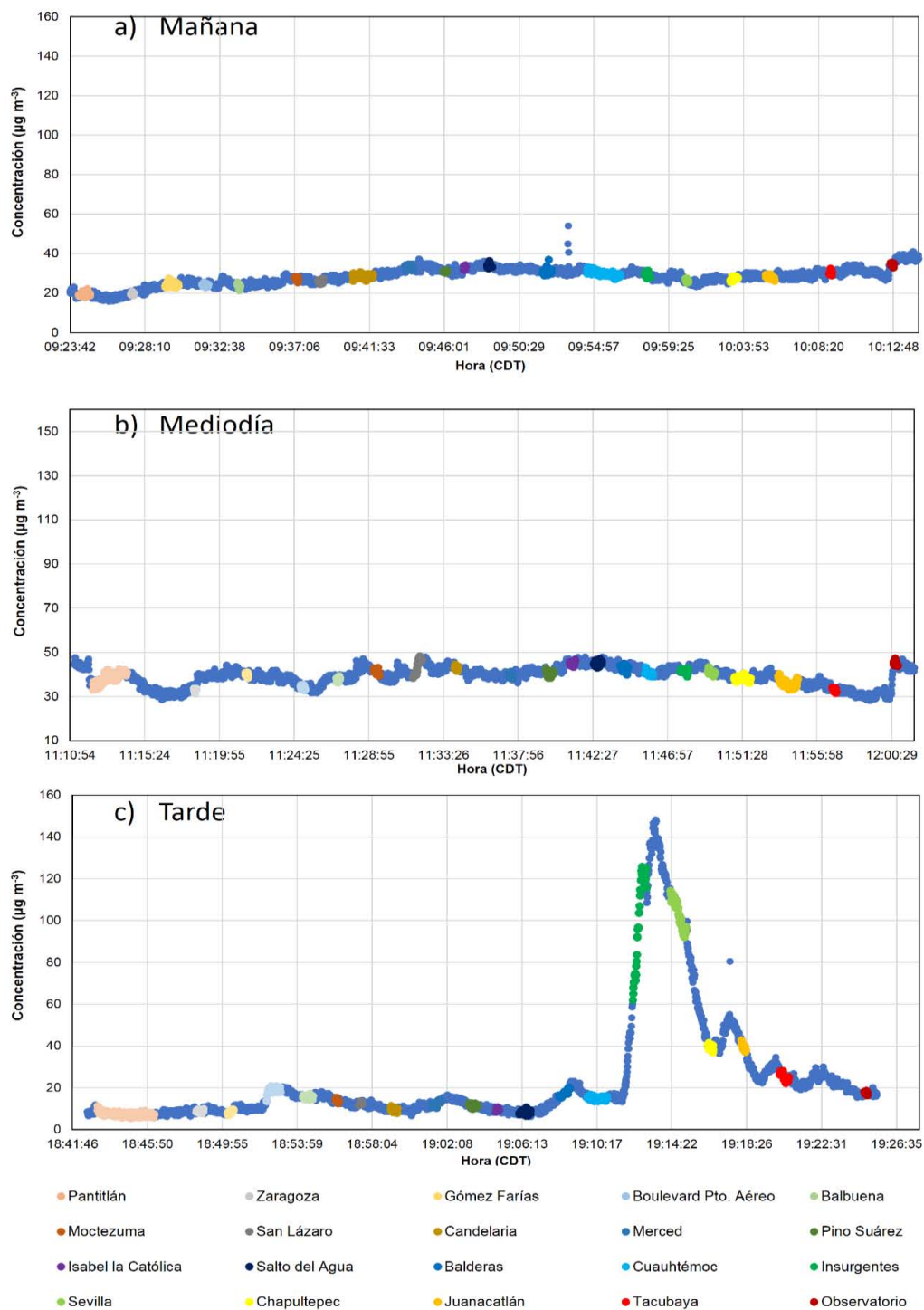


Figura 21. Concentraciones ambiente de $\text{PM}_{2.5}$ observadas en la Línea 1 del Metro en el trayecto Pantitlán-Observatorio en temporada seca fría de 2017.

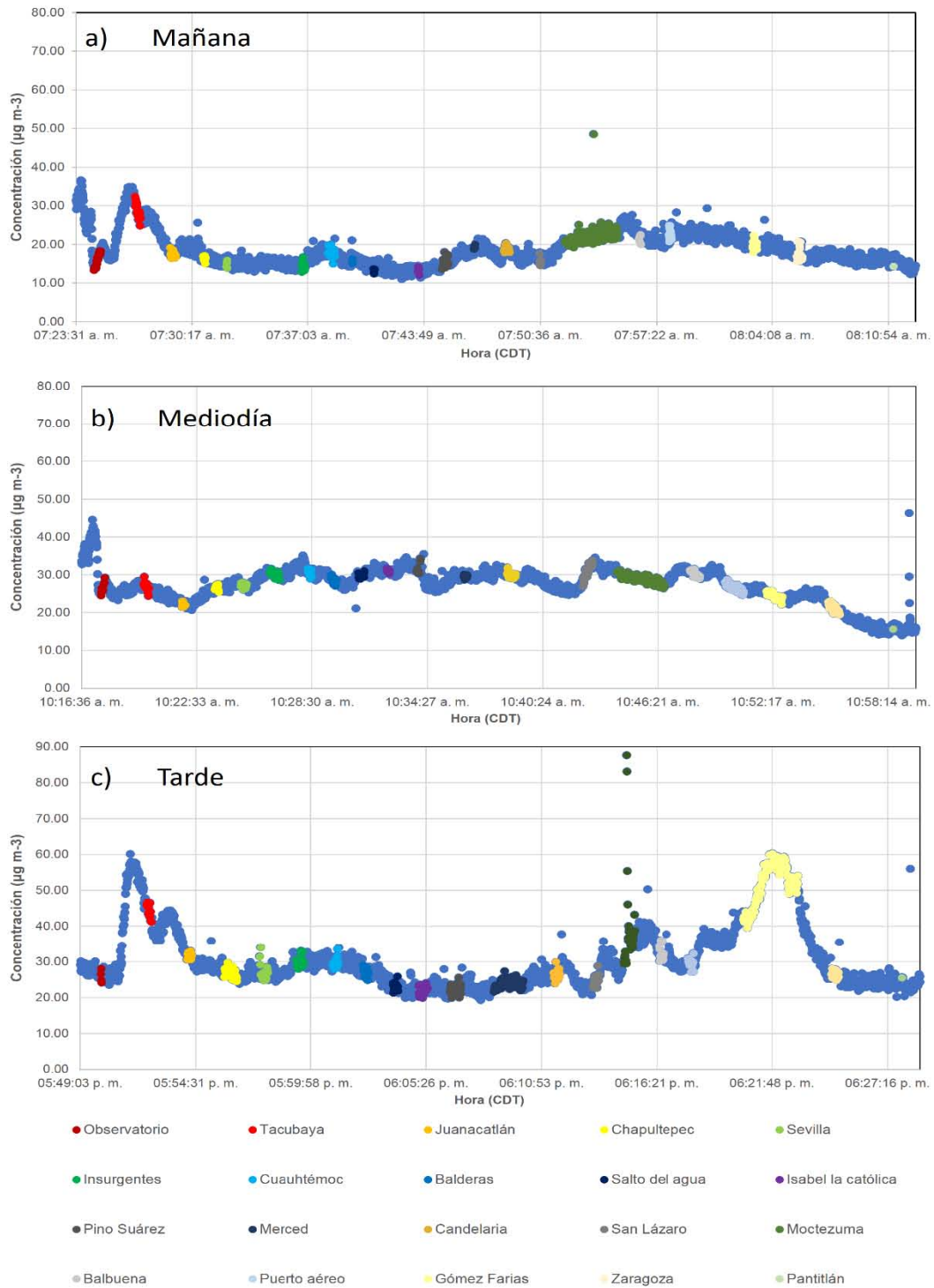


Figura 22. Concentraciones ambiente de $\text{PM}_{2.5}$ observadas en la Línea 1 del Metro en el trayecto de Observatorio-Pantitlán en temporada seca caliente de 2018.

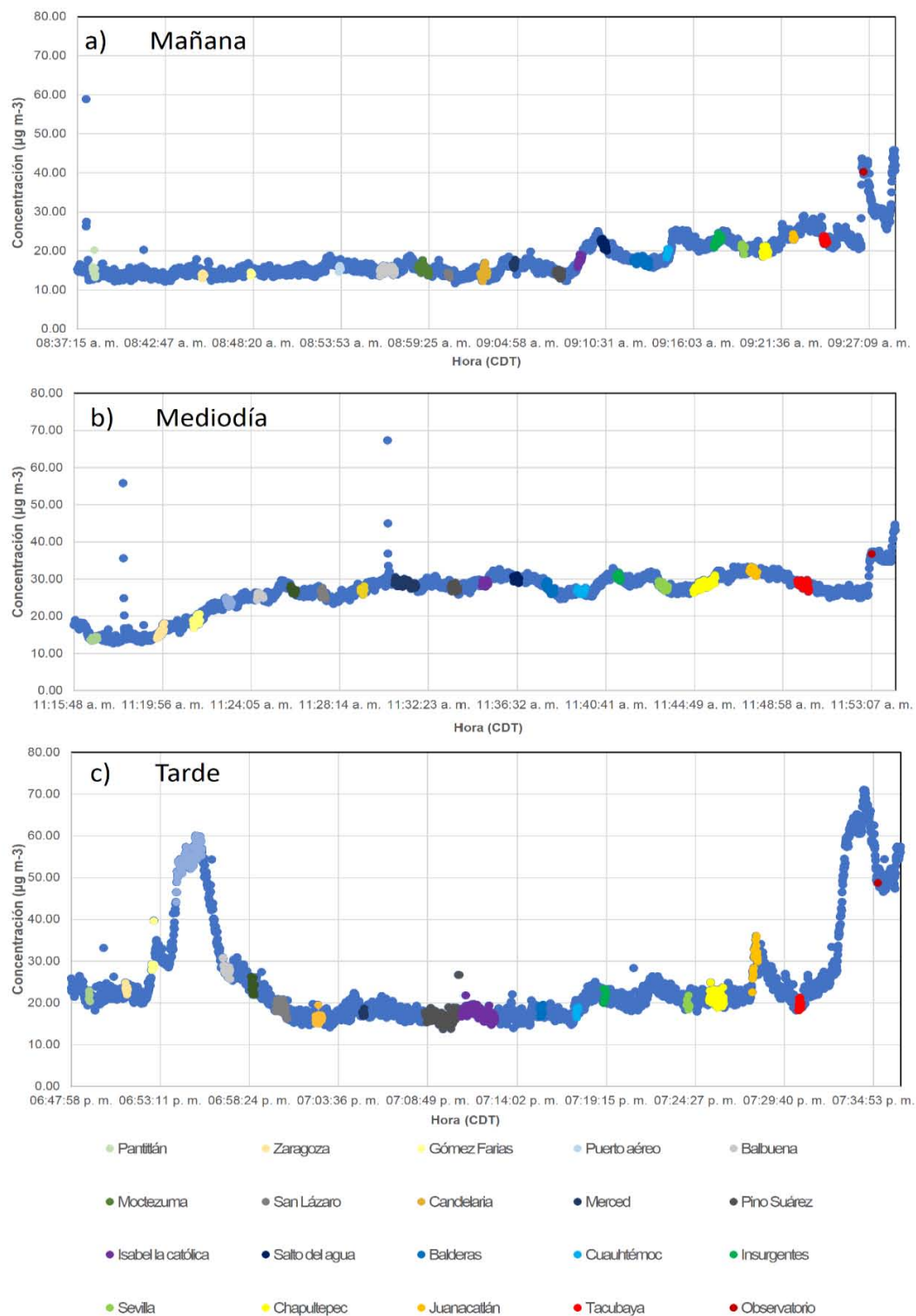


Figura 23. Concentraciones ambiente de $\text{PM}_{2.5}$ observadas en la Línea 1 del Metro en el trayecto Pantitlán-Observatorio en temporada seca caliente de 2018.

Los perfiles de concentración de PM_{2.5} muestran que en ambas temporadas los menores valores se observan por la tarde (Fig. 20-23). Las concentraciones de PM_{2.5} muestran los mayores niveles en el horario de medio día. En la campaña realizada en la temporada seca fría se observa un comportamiento constante en las concentraciones de PM_{2.5} con pocos picos de concentración a lo largo de los viajes realizados (Fig. 20-21). Las concentraciones de PM_{2.5} en el trayecto de ida de la línea 1 se encuentran en su mayoría entre 20 y 30 $\mu\text{g m}^{-3}$ en la mañana, entre 30 y 40 $\mu\text{g m}^{-3}$ al medio día y entre 10 y 20 $\mu\text{g m}^{-3}$ por la tarde. Los trayectos de regreso mostraron valores de concentración de PM_{2.5} en su mayoría de entre 20 y 40 $\mu\text{g m}^{-3}$ en la mañana, entre 30 y 50 $\mu\text{g m}^{-3}$ en mediodía y entre 10 y 20 $\mu\text{g m}^{-3}$ en la tarde inicialmente hasta Cuauhtémoc. Se observó un pico en la zona del cruce con la Av. Insurgentes con valores de entre 20 y hasta 150 $\mu\text{g m}^{-3}$. En ambos trayectos son claros picos de concentración en las estaciones de Insurgentes, Balderas, Salto del agua, Pino Suarez, Moctezuma y Gómez Farías.

Las Figuras 22-23 muestran los resultados de la campaña de la temporada seca caliente de 2018. En el trayecto de ida se observa que la concentración de PM_{2.5} oscila en su mayoría entre 15 y 25 $\mu\text{g m}^{-3}$ en la mañana, entre 20 y 35 $\mu\text{g m}^{-3}$ al mediodía y entre 20 y 40 $\mu\text{g m}^{-3}$ en la noche, aunque se alcanzan picos de concentración con valores de entre 60 y 90 $\mu\text{g m}^{-3}$. En el trayecto de regreso las concentraciones oscilaron mayoritariamente entre 10 y 30 $\mu\text{g m}^{-3}$ en el horario de la mañana, entre 15 y 35 $\mu\text{g m}^{-3}$ al mediodía, con valores máximos de 49, 59 y 69 $\mu\text{g m}^{-3}$, mientras que por la noche las concentraciones variaron entre 15 y 30 $\mu\text{g m}^{-3}$ con máximos de 72, 60, 40 y 35 $\mu\text{g m}^{-3}$.

Durante la temporada seca caliente, los picos de concentración de PM_{2.5} en el trayecto de ida se presentaron en las estaciones de Tacubaya, Insurgentes, Balderas, Salto del agua, San Lázaro, Moctezuma y Gómez Farías. En el trayecto de regreso los picos de concentración se observaron en las estaciones Gómez Farías, Boulevard puerto aéreo, Moctezuma, Salto del agua, Balderas, Insurgentes y Observatorio, con similitudes en los picos observados para ambos trayectos. Es

claro que la mayoría de los picos observados se registraron en estaciones donde existen transbordos de líneas.

4.1.2 Metro Línea 3

La Tabla 9 define los trayectos de muestreo realizados en el Metro Línea 3 en ambas temporadas.

Tabla 9. Descripción del trayecto realizado para las mediciones de los niveles de PM_{2.5} en el Metro Línea 3.

Trayecto	Dirección
Ida	De Universidad a Indios Verdes
Regreso	De Indios Verdes a Universidad

Las Figuras 24-25 muestran las concentraciones de PM_{2.5} durante la temporada seca fría del 2017 y las Figuras 26-27 las concentraciones de PM_{2.5} durante la temporada seca caliente del 2018 en la Línea 3 del Metro.

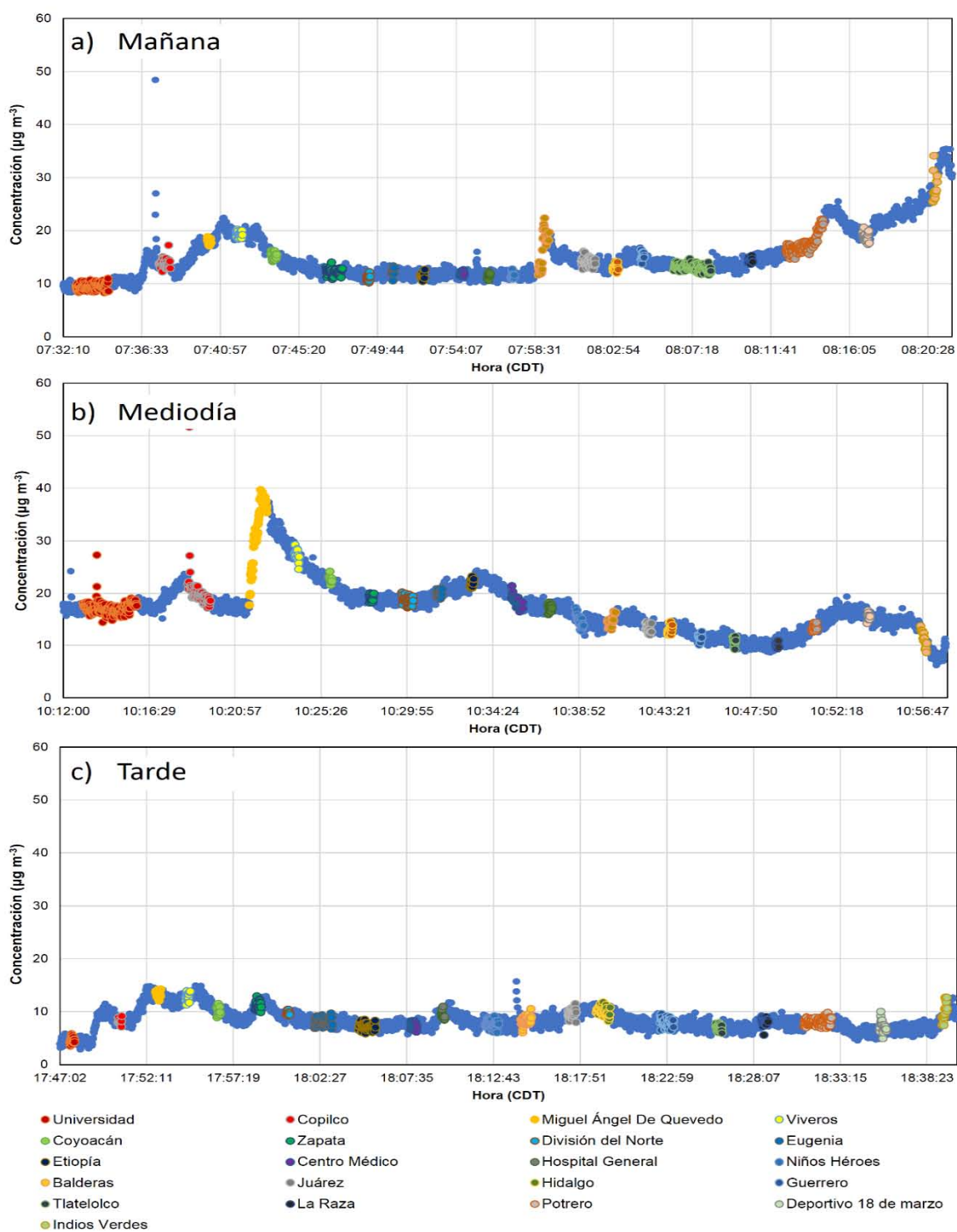


Figura 24. Concentraciones ambiente de $\text{PM}_{2.5}$ observadas en la Línea 3 del Metro en el trayecto de ida (Universidad-Indios Verdes) en la temporada seca fría del 2017.

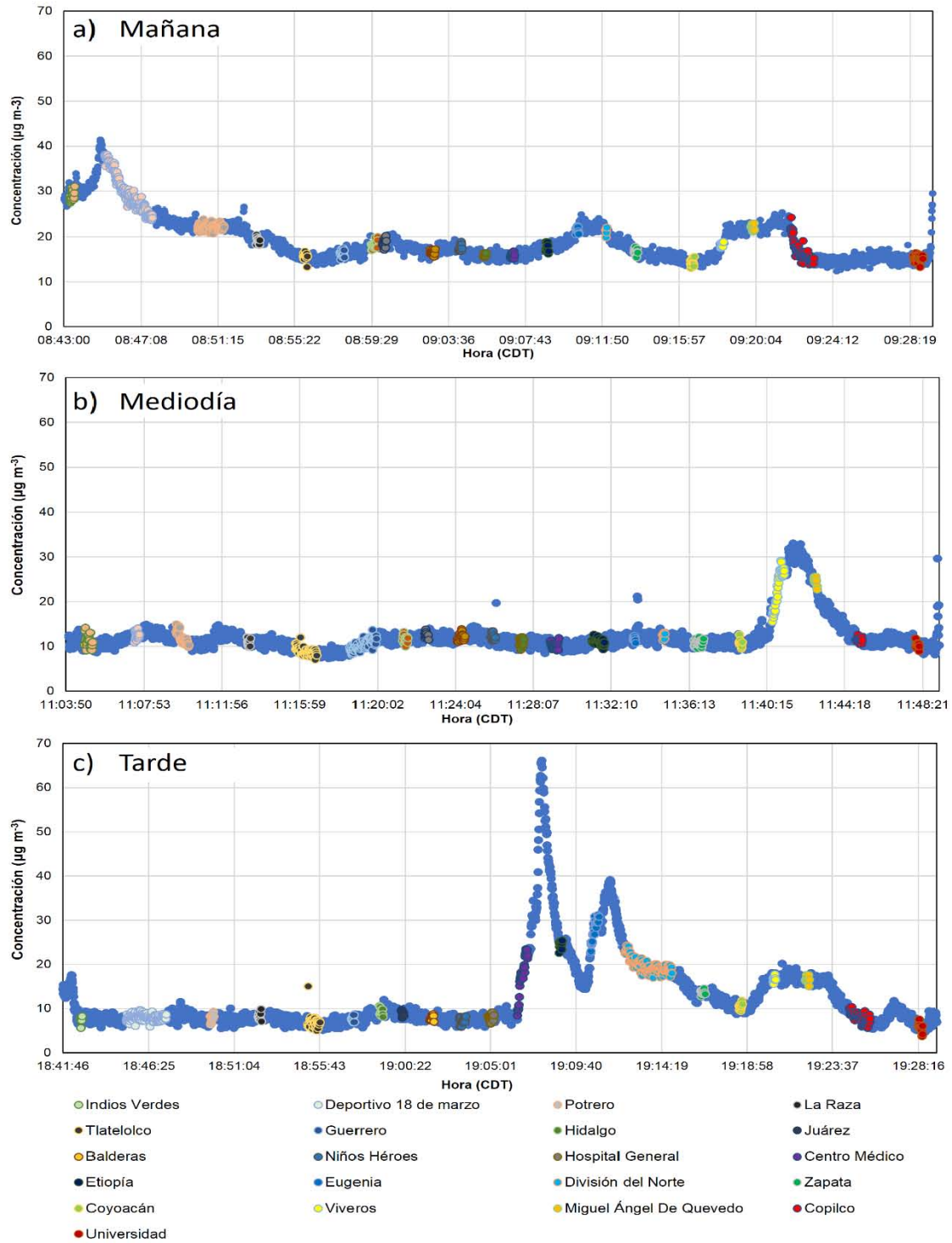


Figura 25. Concentraciones ambiente de $\text{PM}_{2.5}$ observadas en la Línea 3 del Metro en el trayecto de regreso (Indios Verdes-Universidad) en la temporada seca fría del 2017.

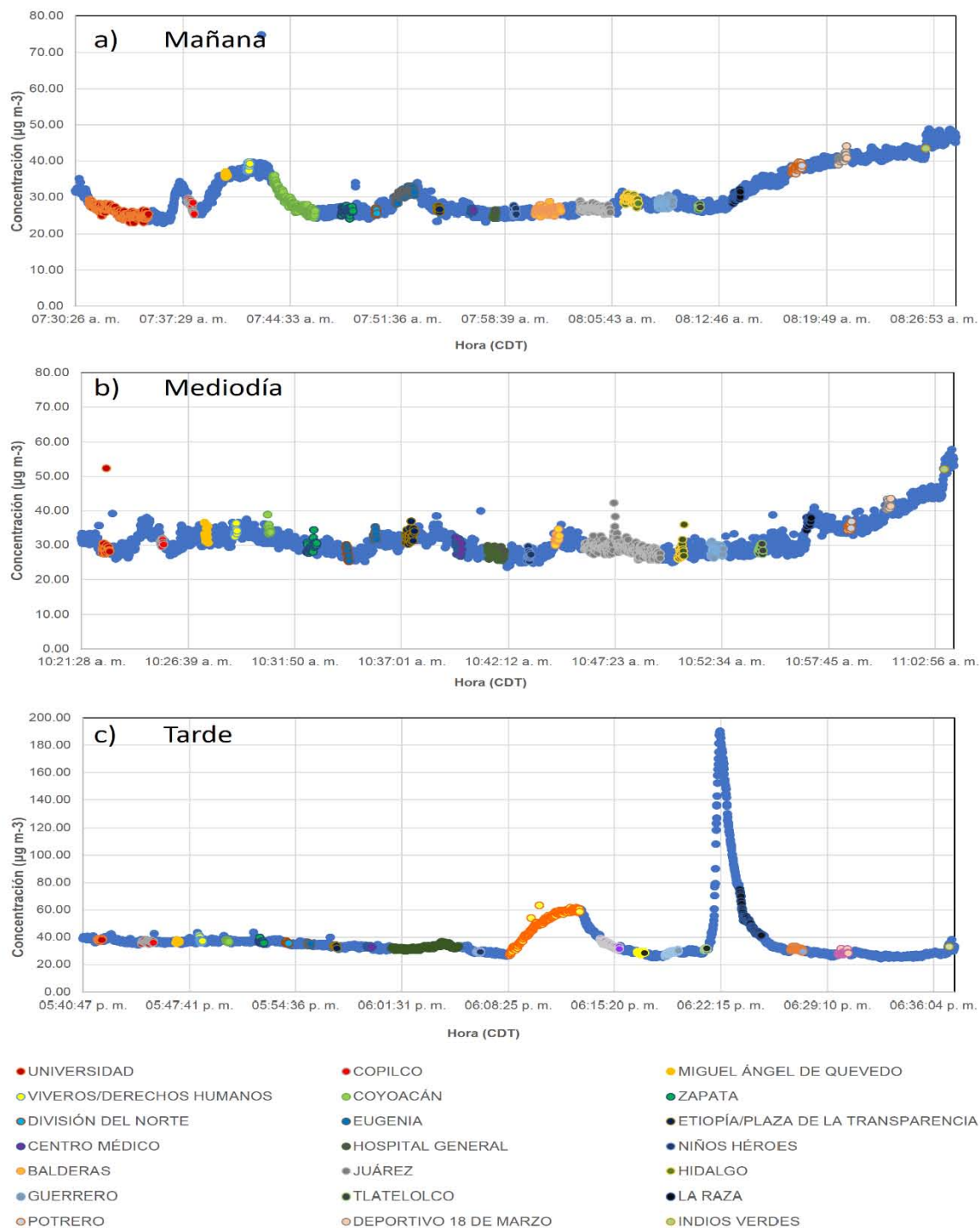


Figura 26. Concentraciones ambiente de $\text{PM}_{2.5}$ observadas en la Línea 3 del Metro en el trayecto de ida (Universidad-Indios Verdes) en la temporada seca caliente del 2018.

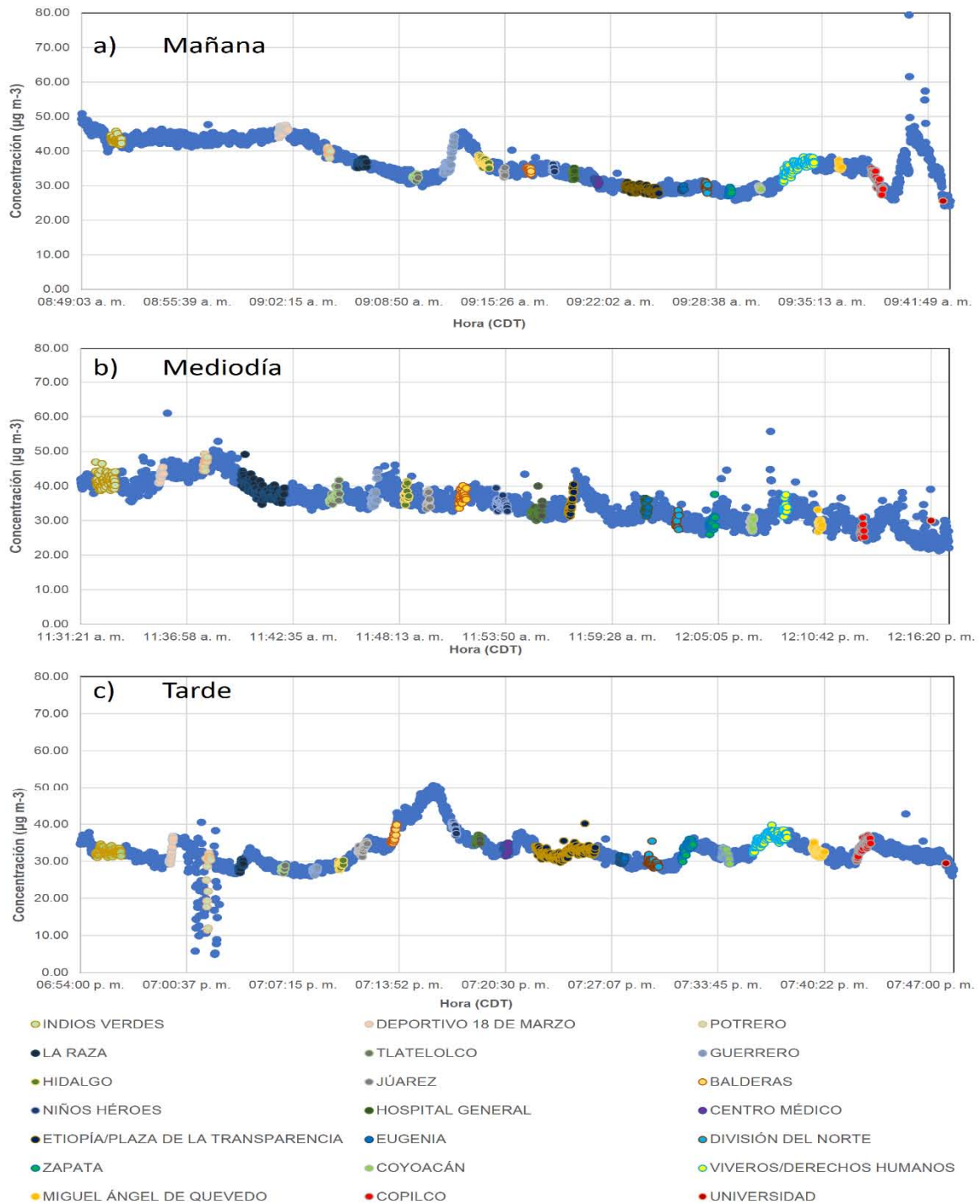


Figura 27. Concentraciones ambiente de $\text{PM}_{2.5}$ observadas en la Línea 3 del Metro en el trayecto de regreso (Indios Verdes-Universidad) en la temporada seca caliente del 2018.

En ambas temporadas, las menores concentraciones de $PM_{2.5}$ se observan en el horario de la tarde-noche en ambos trayectos, mientras que las concentraciones exhiben los niveles más altos al mediodía para el trayecto de ida y por la mañana para el trayecto de regreso. Durante la temporada seca fría, se observan pocas variaciones en las concentraciones de $PM_{2.5}$ con la presencia de algunos picos (Fig. 24-25). Las concentraciones de $PM_{2.5}$ en el trayecto de ida oscilaron entre 10 y 18 $\mu g\ m^{-3}$ por la mañana, entre 15 y 20 $\mu g\ m^{-3}$ al mediodía y entre 8 y 10 $\mu g\ m^{-3}$ en la tarde. En los trayectos de regreso, la concentración de $PM_{2.5}$ varió entre 14 y 20 $\mu g\ m^{-3}$ por la mañana, entre 8 y 15 $\mu g\ m^{-3}$ al mediodía y entre 5 y 12 $\mu g\ m^{-3}$ por la tarde. En ambos trayectos, se observan picos de forma consistente en las estaciones de Copilco, Miguel Ángel de Quevedo, Zapata, Centro Médico, Balderas, Potrero e Indios Verdes.

En la campaña de la temporada seca caliente (Fig. 26-27), la concentración de $PM_{2.5}$ muestra mayor variación en comparación con la temporada seca fría. En el trayecto de ida, la concentración de $PM_{2.5}$ osciló entre 22 y 30 $\mu g\ m^{-3}$ por la mañana, entre 27 y 37 $\mu g\ m^{-3}$ al mediodía y entre 20 y 40 $\mu g\ m^{-3}$ por la tarde, aunque es durante este último periodo cuando se observan picos de concentración con valores de entre 65 y 180 $\mu g\ m^{-3}$. Para el trayecto de regreso, la concentración varió entre 28 y 45 $\mu g\ m^{-3}$ durante la mañana, entre 28 y 40 $\mu g\ m^{-3}$ al mediodía y entre 27 y 40 $\mu g\ m^{-3}$ por la tarde.

Durante la temporada seca caliente, los picos de concentración en el trayecto de ida se observaron entre las estaciones de Universidad y Copilco, en Miguel Ángel de Quevedo, Balderas, Hidalgo, entre La raza y Tlatelolco, Deportivo 18 de Marzo e Indios Verdes. En contraste, en el trayecto de regreso las concentraciones muestran baja variación. No obstante, en ambos trayectos la mayoría de los picos de concentración fueron observados en estaciones con transbordos de líneas.

4.1.3 Comparación entre temporadas y líneas del metro

La Figura 28 muestra la comparación entre los niveles de $PM_{2.5}$ observados para las dos temporadas en los dos trayectos realizados en el metro línea 1 en los tres horarios establecidos. Globalmente, se observaron los mayores niveles de concentración de $PM_{2.5}$ al mediodía en ambas temporadas y, en la mayoría de los casos, los promedios aritméticos son superiores a la media de las concentraciones de $PM_{2.5}$ medidas. Además, la dispersión de las concentraciones entre la mediana y el percentil 95 es mayor a aquella entre la mediana y el percentil 5 en la mayoría de los trayectos realizados, mientras que solo en el horario de la tarde se observan variaciones claras alrededor de la mediana de los valores, en particular para la temporada seca caliente. Dicho comportamiento está dado por la presencia de una mayor cantidad de picos de concentración de $PM_{2.5}$ en los trayectos realizados en comparación con la menor variación observada en los niveles de $PM_{2.5}$ durante la temporada seca fría.

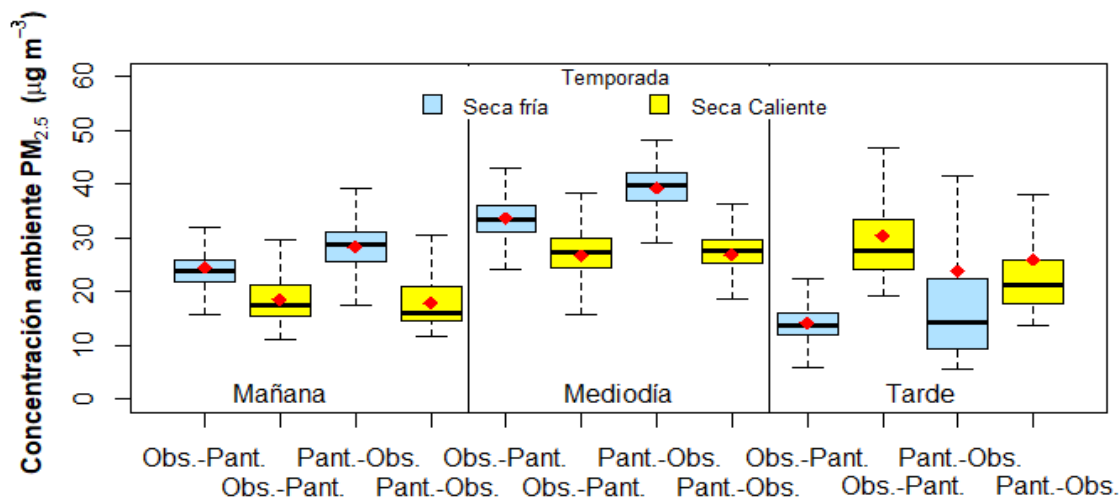


Figura 28. Gráfica de caja y bigotes de las concentraciones ambiente de $PM_{2.5}$ observadas en la Línea 1 del Metro Observatorio (Obs.) – Pantitlán (Pant.) en las temporadas seca fría de 2017 y seca caliente de 2018. La línea horizontal (—) muestra la mediana y la marca roja (♦) el promedio aritmético, los extremos de la caja el percentil 25 y 75, y los bigotes los percentiles 5 y 95.

En la línea 1 del metro, la comparación entre ambas campañas muestra que los valores observados y los perfiles de concentración son similares, no obstante, la Figura 28 muestra mayores niveles de concentración de PM_{2.5} en la temporada seca fría.

Por otro lado, en la línea 3 del metro se observaron los mayores niveles de PM_{2.5} en la temporada seca caliente, los cuales variaron entre 15 y 25 µg m⁻³ por arriba de las concentraciones típicas de PM_{2.5} registradas en la temporada seca fría.

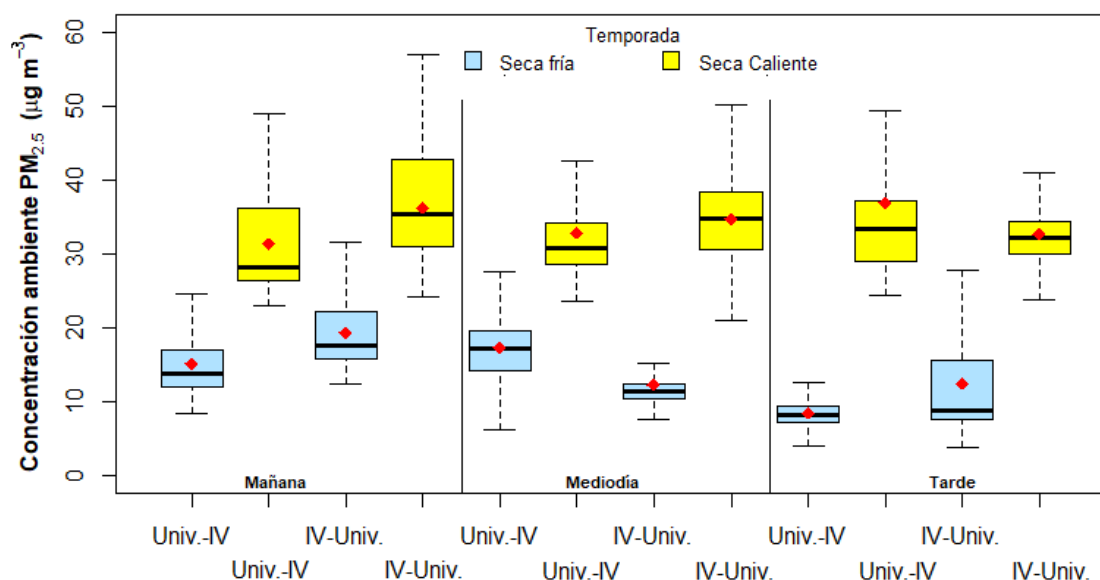


Figura 29. Gráfica de caja y bigotes de las concentraciones ambiente de PM_{2.5} observadas en la Línea 3 del Metro Universidad (Univ.) – Indios Verdes (IV) en las temporadas seca fría de 2017 y seca caliente de 2018. La línea horizontal (—) muestra la mediana, la marca roja (♦) el promedio aritmético, los extremos de la caja el percentil 25 y 75, y los bigotes los percentiles 5 y 95.

La Figura 29 muestra que los niveles de concentración de PM_{2.5} son similares en los tres horarios en ambas temporadas, además, es claro que mayoritariamente se presentaron valores por encima del promedio con una mayor dispersión entre el percentil 50 y 75 de los datos obtenidos.

Por otro lado, con los datos registrados de ambas líneas en su trayecto completo en las dos campañas de muestreo (temporada seca fría y la temporada seca caliente), globalmente la suma de los promedios de concentración de $PM_{2.5}$ (reportados en los anexos VI y VII) denotan un mayor nivel de exposición a $PM_{2.5}$ en la temporada seca caliente, también se puede presumir mayor nivel de exposición a $PM_{2.5}$ en las estaciones (de 8.5 a 39.8 $\mu g\ m^{-3}$) que en los túneles o trayectos entre estaciones (de 8.3 a 38.9 $\mu g\ m^{-3}$).

Finalmente, la comparación de los niveles de $PM_{2.5}$ reportados en las Figuras 28 y 29 y acorde con los promedios aritméticos globales calculados que se presentan en el Anexo VII y VIII (en estaciones, entre estaciones y de trayecto completo), se presume una mayor exposición personal a $PM_{2.5}$ con valores de 13.8 a 39.8 $\mu g\ m^{-3}$ en la línea 1 del metro comparada con aquella determinada de 8.3 a 38.5 $\mu g\ m^{-3}$ en la línea 3 del mismo.

4.2 Exposición personal a $PM_{2.5}$ en Metrobús

4.2.1 Metrobús Línea 1

En esta sección se presentan los resultados de las campañas de muestreo realizadas en el Metrobús Línea 1 en ambas temporadas. En dichas campañas los trayectos se definen de la siguiente manera:

Tabla 10. Descripción de los trayectos realizados en el Metrobús línea 1.

Trayecto	Dirección
Ida	De El Caminero a Indios Verdes
Regreso	De Indios Verdes a El Caminero

Las Figuras 30-31 muestran los resultados de las concentraciones de $PM_{2.5}$ observadas para la temporada seca fría del 2017 y las Figuras 32-33 para la temporada seca caliente del 2018.

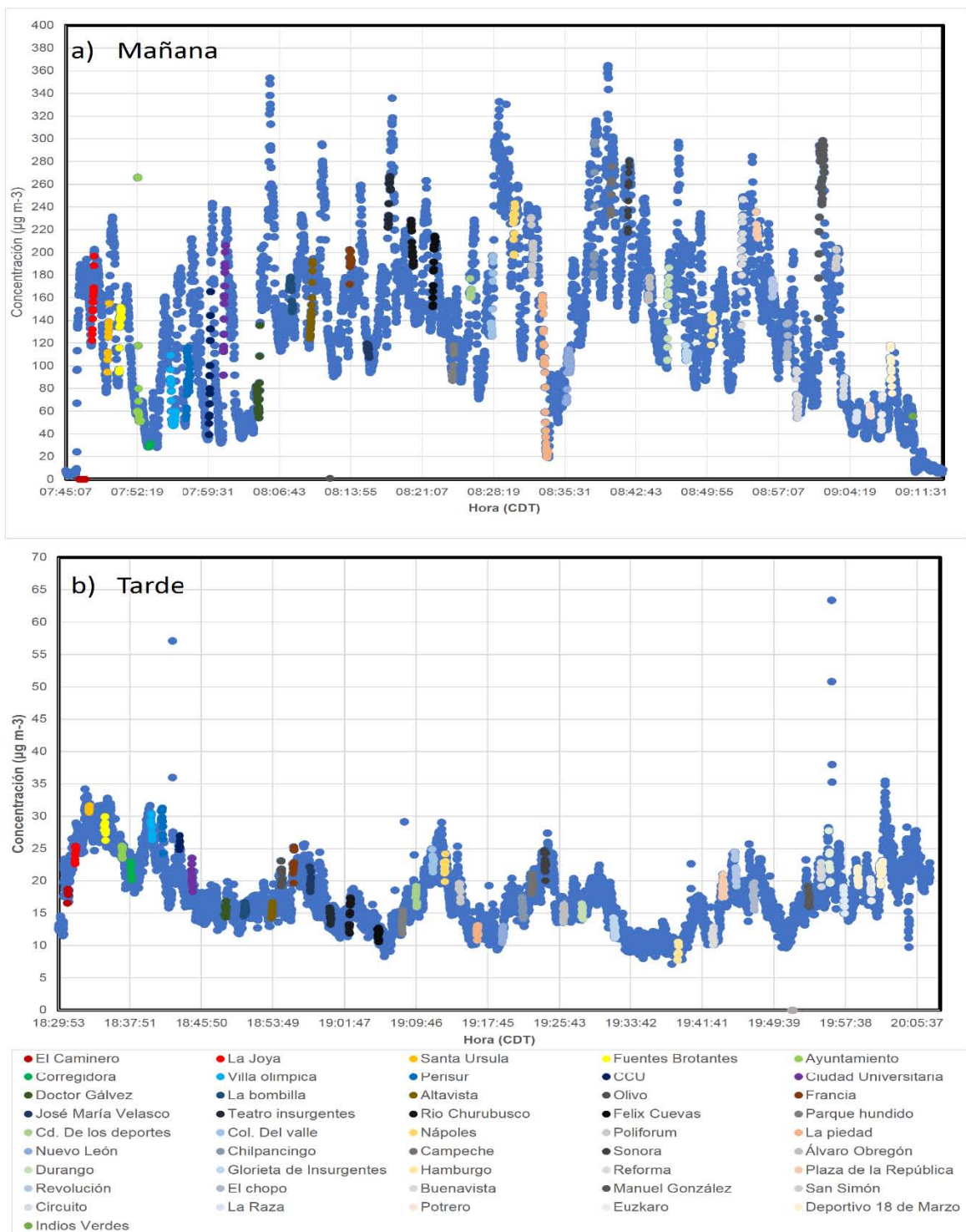


Figura 30. Resultados de la campaña de muestreo realizada en la Línea 1 del Metrobús en el trayecto de ida (El caminero-Indios Verdes) en la temporada seca fría del 2017.

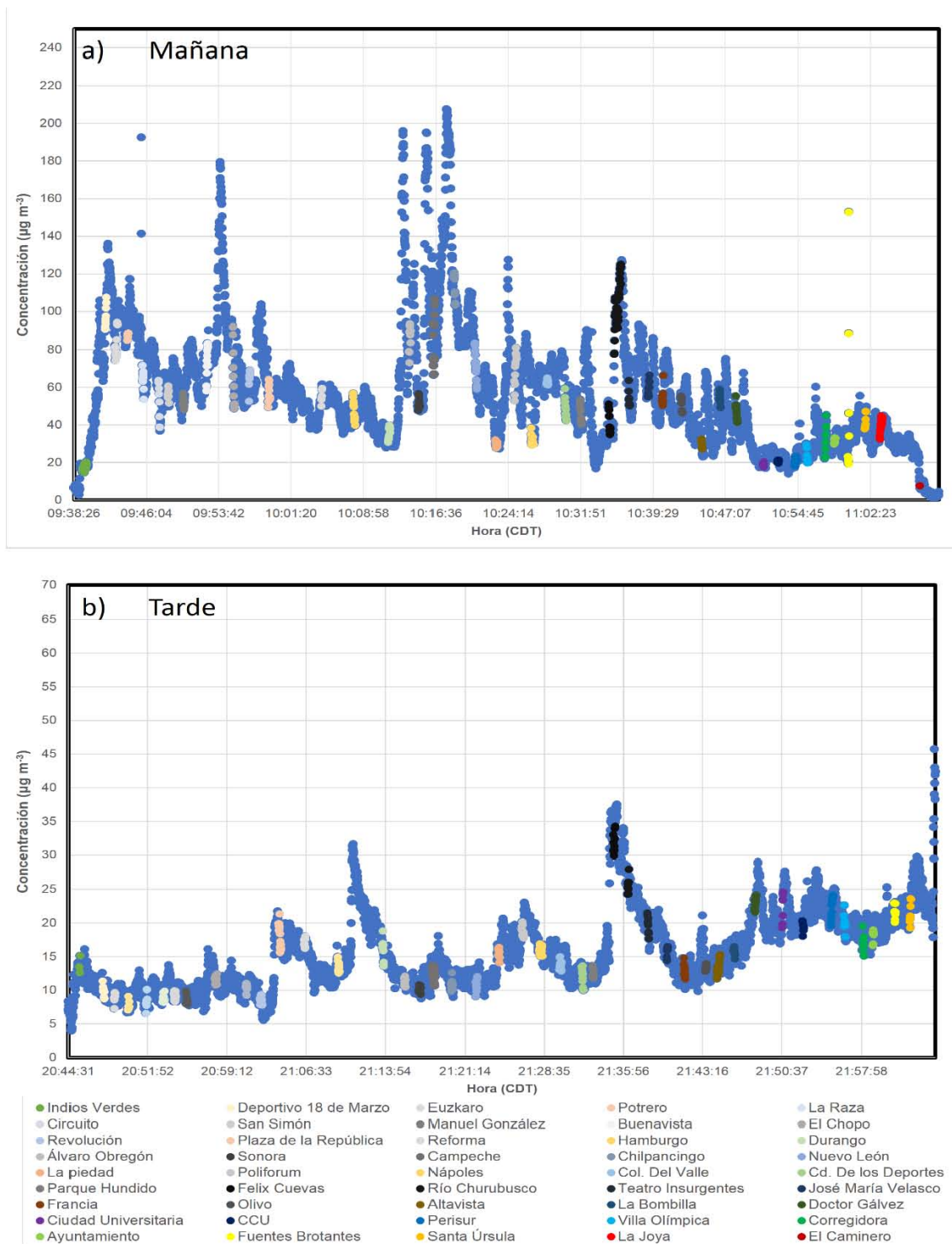


Figura 31. Resultados de la campaña de muestreo realizada en la Línea 1 del Metrobús en el trayecto de regreso (Indios Verdes-El caminero) en la temporada seca fría de 2017.

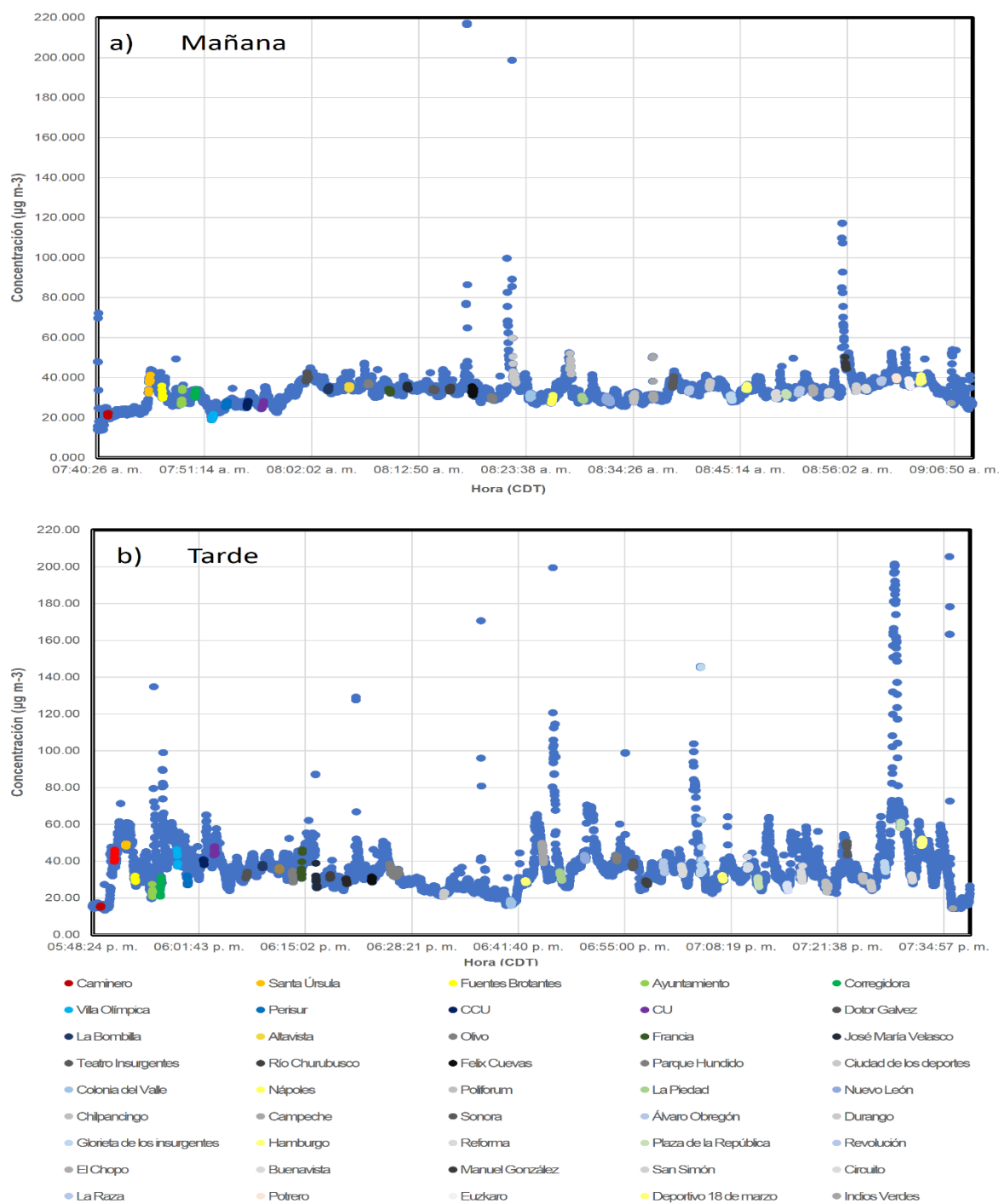


Figura 32. Resultados de la campaña de muestreo realizada en la Línea 1 del Metrobús en el trayecto de ida (El caminero-Indios Verdes) en la temporada seca caliente del 2018.

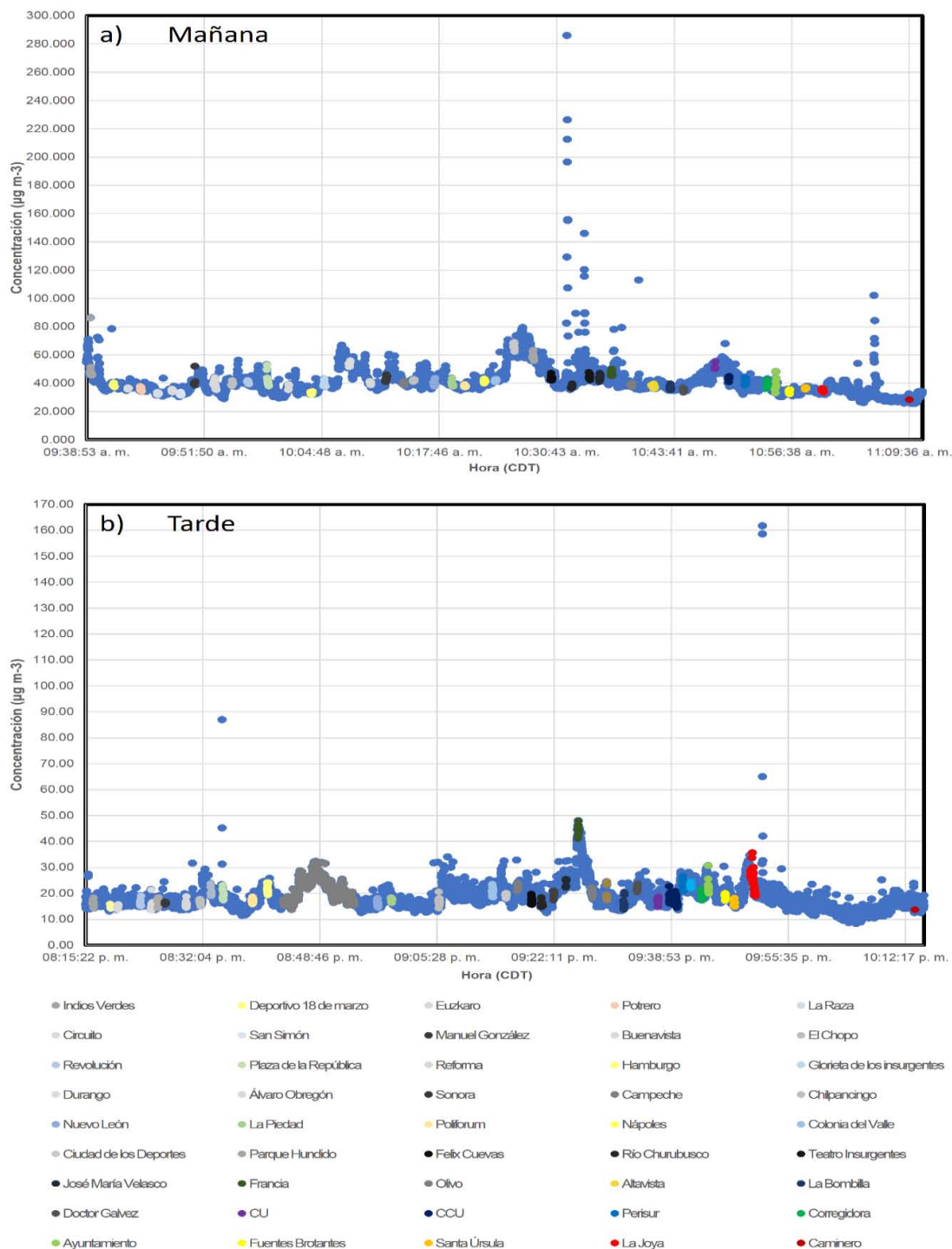


Figura 33. Resultados de la campaña de muestreo realizada en la Línea 1 del Metrobús en el trayecto de regreso (Indios Verdes-El caminero) en la temporada seca caliente del 2018.

Los perfiles de concentración de $PM_{2.5}$ para los tres diferentes horarios muestran que en ambas temporadas, las mayores concentraciones se observan en el horario de mañana y las menores en el horario de tarde para ambos trayectos. En la campaña realizada en la temporada seca fría, las concentraciones exhiben múltiples picos a lo largo de todo el trayecto. Por ejemplo, las concentraciones de $PM_{2.5}$ en el trayecto de ida se encuentran en su mayoría entre 100 y $200 \mu g m^{-3}$ en la mañana y entre 15 y $25 \mu g m^{-3}$ en el horario de la tarde. En el trayecto de regreso, se observaron concentraciones mayoritariamente entre 30 y $80 \mu g m^{-3}$ en la mañana y, entre 10 y $25 \mu g m^{-3}$ en la tarde. En los trayectos realizados, los picos de concentración son claramente observados en las estaciones La Joya, Olivo, Francia, Rio Churubusco, Félix Cuevas, Poliforum, Nápoles, Campeche, El chopo, Sonora, Plaza de la República y Deportivo 18 de Marzo.

La campaña de la temporada seca caliente se observan pocas variaciones en la concentración de $PM_{2.5}$ lo cual contrasta con las observadas en la temporada seca fría cuando existieron mayores variaciones. En el trayecto de ida, las concentraciones de $PM_{2.5}$ oscilaron mayoritariamente entre 30 y $50 \mu g m^{-3}$ en la mañana y, entre 20 y $70 \mu g m^{-3}$ por la tarde, aunque es durante este último periodo cuando se registraron picos de hasta $119 \mu g m^{-3}$. En el trayecto de regreso, las concentraciones variaron entre 30 y $60 \mu g m^{-3}$ en el horario de la mañana y en el horario de la tarde entre 12 y $30 \mu g m^{-3}$. Además, es claro que en ambos horarios los perfiles de las concentraciones de $PM_{2.5}$ muestran un comportamiento similar.

Los picos de concentración de $PM_{2.5}$ en el trayecto de ida se observaron en las estaciones La joya, Santa Úrsula, Ayuntamiento, Dr. Gálvez, entre rio Churubusco y Félix cuevas, en Ciudad de los deportes, Poliforum, Durango, Plaza de la República y Manuel González. En ambos trayectos, la mayor parte de los picos registrados coinciden con estaciones que se ubican en calles altamente transitadas o tenían cerca obras de construcción, así como intersecciones con avenidas principales.

En el Metrobús línea 1, comparando ambas campañas se aprecian que los valores y perfiles de concentración son muy similares, a excepción del trayecto de ida en la

mañana en la campaña en temporada seca fría, los demás resultados arrojan valores de concentración de PM_{2.5} mayor en la temporada seca caliente.

4.2.2 Metrobús Línea 2

Se presentan a continuación los resultados obtenidos de las campañas de muestreo realizadas en el Metrobús Línea 2 en ambas temporadas. En dichas campañas los trayectos fueron definidos de la siguiente manera:

Tabla 11. Descripción de los trayectos realizados en el Metrobús línea 2.

Trayecto	Dirección
Ida	De Tacubaya a Tepalcates
Regreso	De Tepalcates a Tacubaya

Los Figuras 34-35 muestran los resultados obtenidos para la temporada seca fría del 2017 y las Figuras 36-37 para la temporada seca caliente del 2018.

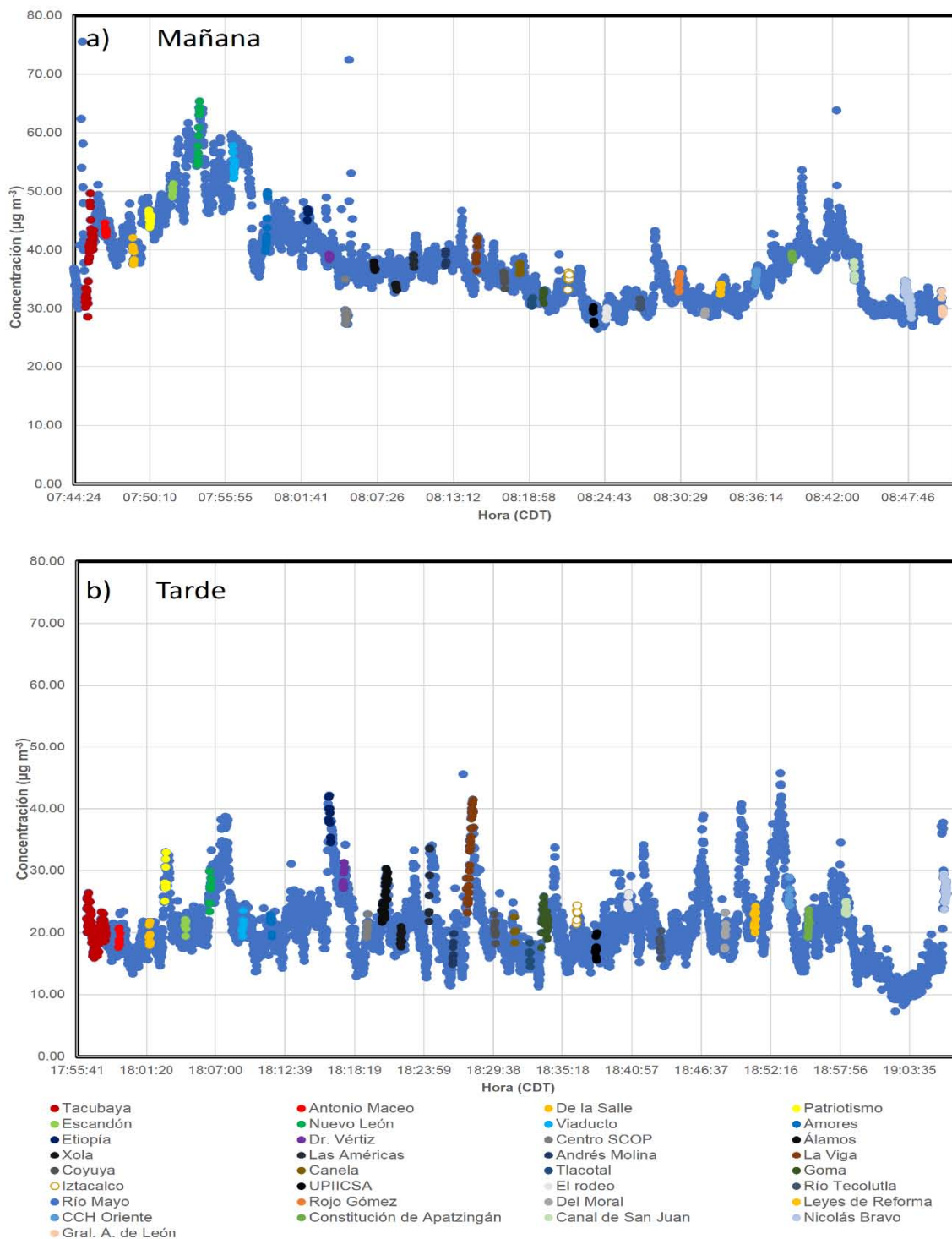


Figura 34. Resultados de la campaña de muestreo realizada en la Línea 2 del Metrobús en el trayecto de ida (Tacubaya-Tepalcates) en temporada seca fría del 2017.

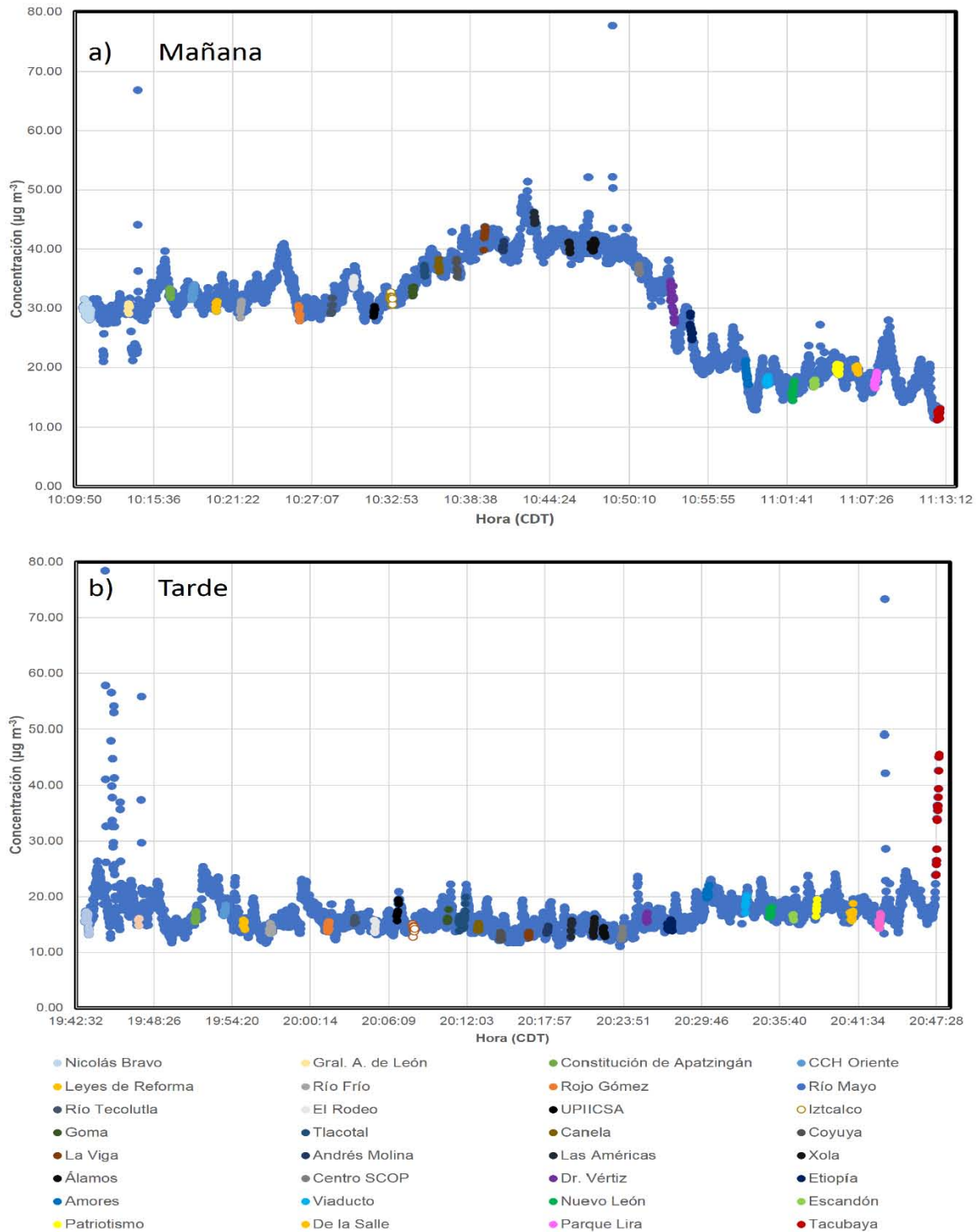


Figura 35. Resultados de la campaña de muestreo realizada en la Línea 2 del Metrobús en el trayecto de regreso (Tepalcates-Tacubaya) en la temporada seca fría del 2017.

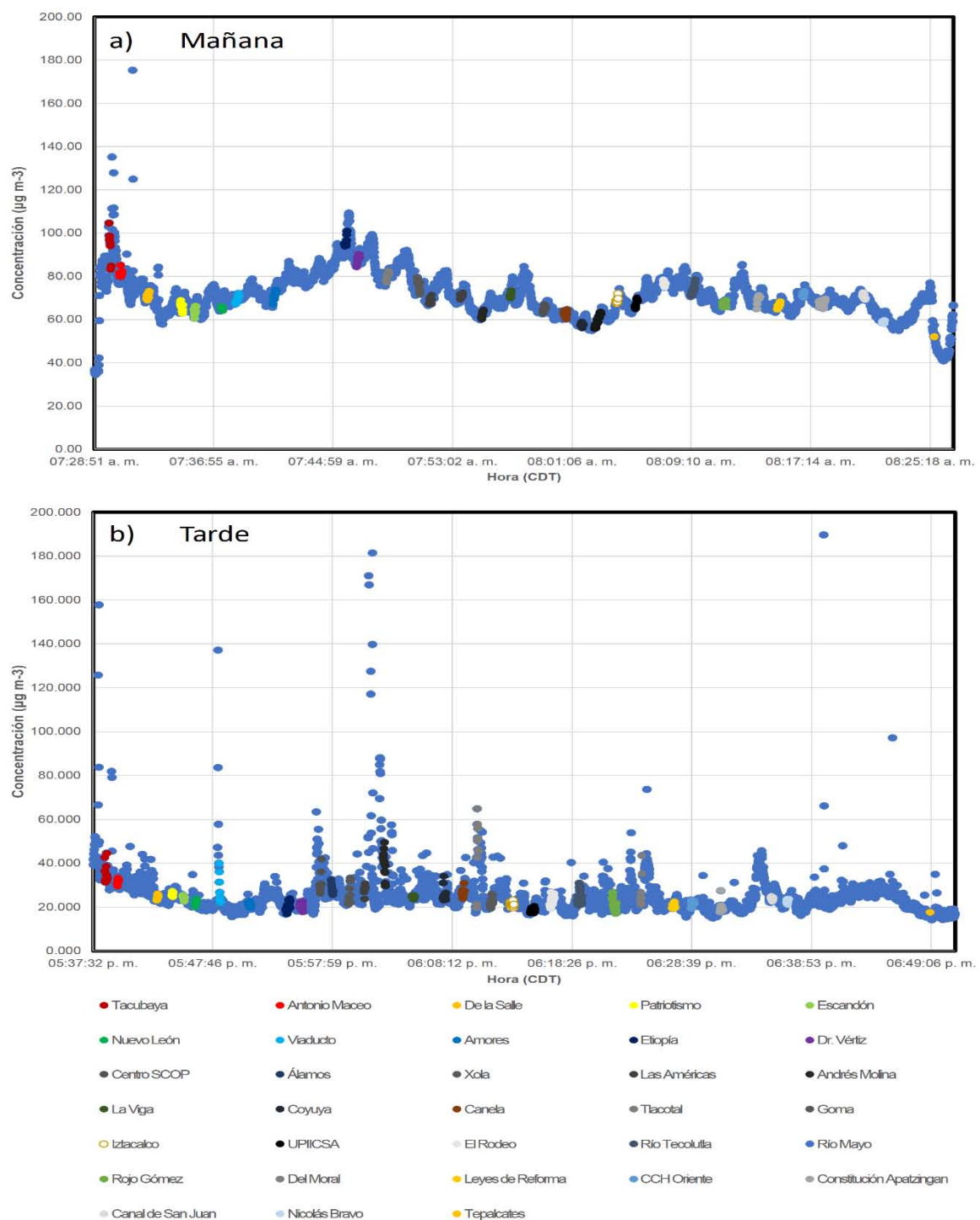


Figura 36. Resultados de la campaña de muestreo realizada en la Línea 2 del Metrobús en el trayecto de ida (Tacubaya-Tepalcates) en la temporada seca fría del 2017.

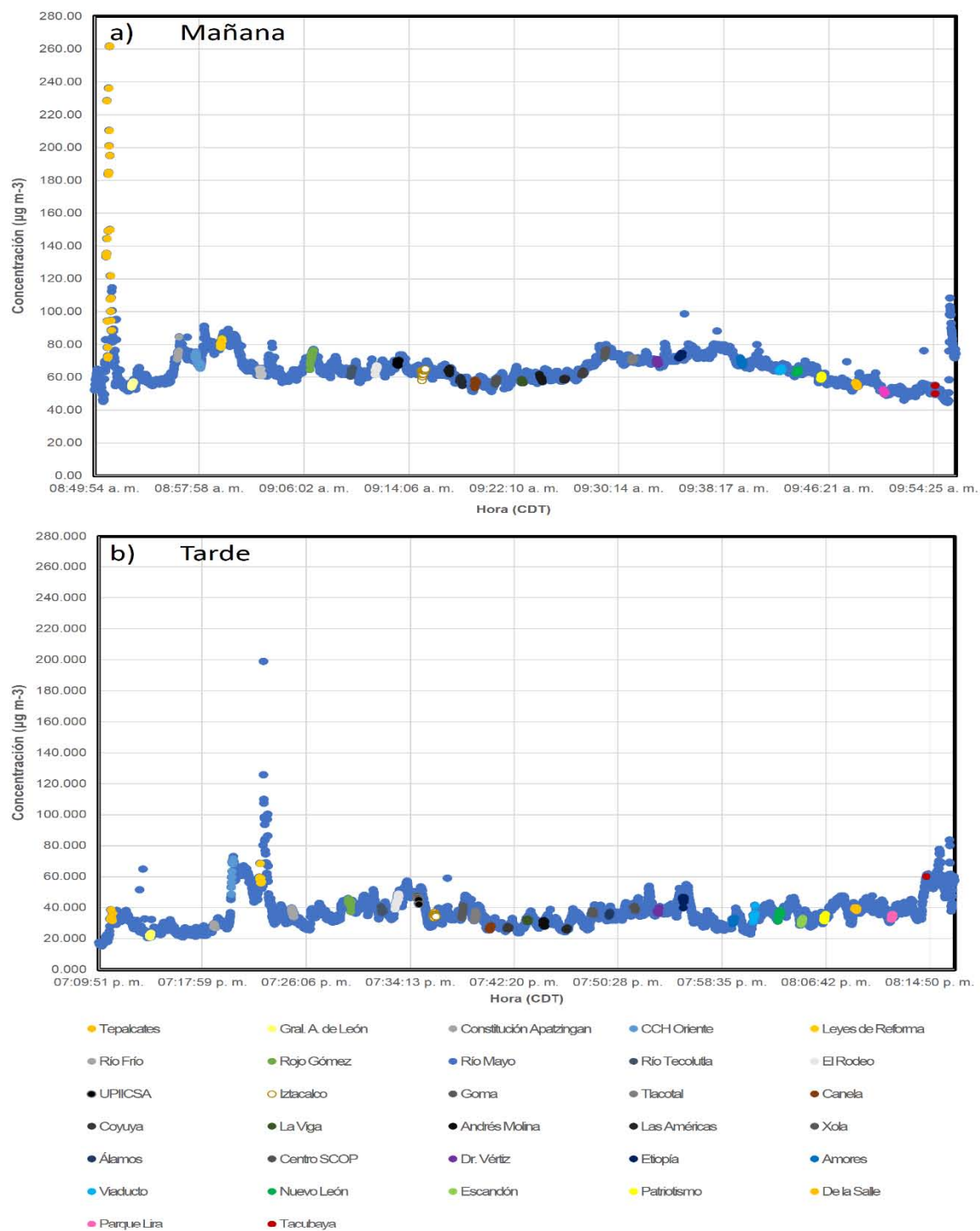


Figura 37. Resultados de la campaña de muestreo realizada en la Línea 2 del Metrobús en el trayecto de regreso (Tepalcates-Tacubaya) en la temporada seca fría del 2017.

Los perfiles de concentración de $PM_{2.5}$ en el Metrobús línea 2 muestran que en los tres diferentes horarios para ambas temporadas, las mayores concentraciones ocurren en el horario de la mañana y las menores en el horario de la tarde en ambos trayectos. En la campaña realizada en la temporada seca fría, se observan variaciones frecuentes con picos de concentración a lo largo de los recorridos. Las concentraciones de $PM_{2.5}$ en el trayecto de ida variaron entre 30 y 50 $\mu g\ m^{-3}$ en la mañana y, entre 15 y 30 $\mu g\ m^{-3}$ por la tarde. Para el trayecto de regreso, se registraron concentraciones en su mayoría entre 20 y 40 $\mu g\ m^{-3}$ en la mañana y, entre 13 y 23 $\mu g\ m^{-3}$ en la tarde, con valores mínimo y máximo de concentración de $PM_{2.5}$ en ambos trayectos de 8 y 78 $\mu g\ m^{-3}$, respectivamente. Las estaciones que mostraron los mayores niveles de $PM_{2.5}$ fueron Patriotismo, Nuevo León, Etiopía, Dr. Vértiz, El rodeo, Leyes de Reforma, Canal de San Juan, Constitución de Apatzingán, UPIICSA y Tacubaya.

Por otro lado, en la campaña realizada durante la temporada seca caliente (Fig. 36-37) se observan ligeras variaciones en las concentraciones de $PM_{2.5}$, y comportamientos similares en ambos trayectos. En el trayecto de ida, la concentración de $PM_{2.5}$ varió entre 60 y 80 $\mu g\ m^{-3}$ en la mañana y, entre 20 y 40 $\mu g\ m^{-3}$ por la tarde, aunque se registraron picos de concentración de hasta 178 $\mu g\ m^{-3}$. En el trayecto de regreso, los valores que se registraron oscilaron entre 50 y 70 $\mu g\ m^{-3}$ en la mañana y, entre 20 y 50 $\mu g\ m^{-3}$ por la tarde, para ambos trayectos la máxima de concentración de $PM_{2.5}$ registrada fue de 200 $\mu g\ m^{-3}$ y el valor mínimo fue de 17 $\mu g\ m^{-3}$.

En la temporada seca caliente, las estaciones que exhibieron las mayores concentraciones de $PM_{2.5}$ fueron Tacubaya, Viaducto, Canal de San Juan, Del Moral, Nuevo León, Etiopía, Leyes de Reforma y Rojo Gómez. Los picos de concentración coinciden en lugares donde había alguna construcción o en estaciones que se ubican en calles mayormente transitadas que intersecaban varias avenidas principales tales como Viaducto Miguel Alemán, Insurgentes Sur, Av. Río Churubusco y Av. Rojo Gómez.

Finalmente, con base en las observaciones realizadas por los voluntarios en las campañas de muestreo, se notó que cuando el voluntario portando el pDR se aproximó a una ventada abierta se apreciaron incrementos en las concentraciones medidas en el instrumento. Además, comparando los resultados obtenidos y con base en las observaciones registradas en las bitácoras de campo e información presentada en el Anexo XI, se distingue que los valores de concentración reportados también pueden ser influenciados por el modelo y tecnología del vehículo en que se realizaron las mediciones (articulado o biarticulado, Euro 3-5). Globalmente, en los autobuses con motor Euro 3 se percibió un olor semejante a hidrocarburos y gases de combustión, en comparación con los autobuses Euro 5. Por resaltar, algunos voluntarios manifestaron malestares y dolores de cabeza cuando las mediciones se realizaron en vehículos Euro 3. Por lo anterior y considerando las concentraciones observadas en las campañas de muestreo, se presume una mayor exposición a $PM_{2.5}$ en los autobuses con tecnología Euro 3 en comparación con aquellos equipados con Euro 5.

4.2.3 Comparación entre temporadas y líneas del Metrobús

De acuerdo con los resultados obtenidos en ambas campañas en la Línea 1 del Metrobús, las concentraciones de $PM_{2.5}$ mostraron variaciones de forma similar, aunque los promedios calculados sugieren una mayor exposición a $PM_{2.5}$ durante la temporada seca fría. Esto puede deberse a los efectos del sismo del 19 de septiembre del 2017 que afectó notoriamente a la Ciudad de México, en particular en zonas aledañas a la ruta de estudio que fueron cerradas a la circulación incrementando el tránsito vehicular sobre la Av. de los Insurgentes lo que incremento los tiempos de recorrido a lo largo de la ruta.

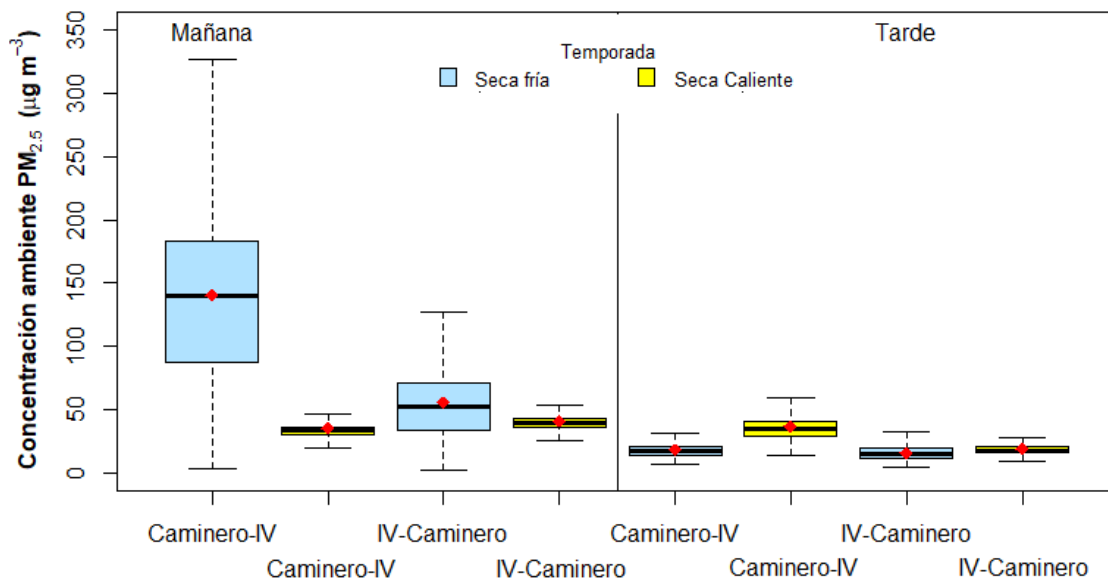


Figura 38. Gráfica de caja y bigotes de las concentraciones ambiente de $PM_{2.5}$ observadas en la Línea 1 del Metrobús El Caminero-Indios Verdes (IV) en las temporadas seca fría de 2017 y seca caliente de 2018. La línea horizontal (—) muestra la mediana y la marca roja (♦) el promedio aritmético, los extremos de la caja el percentil 25 y 75, y los bigotes los percentiles 5 y 95.

La Figura 38 muestra la comparación entre los niveles de $PM_{2.5}$ observados para las dos temporadas en los dos trayectos realizados en la línea 1 del Metrobús en los dos horarios establecidos. Globalmente, se observaron los mayores niveles de concentración de $PM_{2.5}$ en la mañana en ambas temporadas y, en la mayoría de los casos, los promedios aritméticos son superiores a la media de las concentraciones de $PM_{2.5}$ medidas. Además, la dispersión de las concentraciones entre la mediana y el percentil 75 es similar a aquella entre la mediana y el percentil 25 en la temporada seca caliente. Sin embargo, en la temporada seca fría la dispersión de las concentraciones entre la mediana y el percentil 75 mayoritariamente es mayor a aquella entre la mediana y el percentil 25.

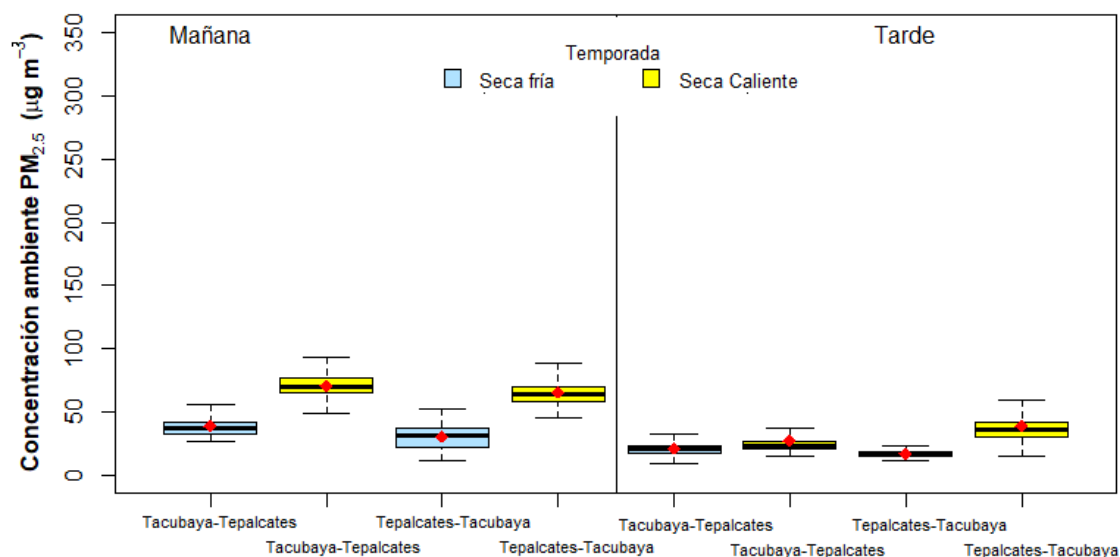


Figura 39. Gráfica de caja y bigotes de las concentraciones ambiente de $PM_{2.5}$ observadas en la Línea 2 del Metrobús Tacubaya-Tepalcates en las temporadas seca fría de 2017 y seca caliente de 2018. La línea horizontal (—) muestra la mediana y la marca roja ($\blacklozenge$) el promedio aritmético, los extremos de la caja el percentil 25 y 75, y los bigotes los percentiles 5 y 95.

En la línea 2 del Metrobús se observaron los mayores niveles de $PM_{2.5}$ en la temporada seca caliente, comparado con la temporada seca fría. La Figura 39 muestra que los niveles de concentración de $PM_{2.5}$ son mayores en la mañana en ambas temporadas, además, es claro que mayoritariamente se presentaron valores por encima del promedio con una mayor dispersión entre el percentil 50 y 95 de los datos obtenidos.

Por otro lado, con los datos registrados de ambas líneas en su trayecto completo en las dos campañas de muestreo (temporada seca fría y la temporada seca caliente), globalmente la suma de los promedios de concentración de $PM_{2.5}$ (reportados en los anexos VI y VII) denotan un mayor nivel de exposición a $PM_{2.5}$ en la temporada seca fría, también se puede presumir mayor nivel de exposición a $PM_{2.5}$ en las estaciones (de 15.1 a 144.5 $\mu g m^{-3}$) que en los túneles o trayectos entre estaciones (de 15.7 a 64.8 $\mu g m^{-3}$).

Finalmente, la comparación de los niveles de $PM_{2.5}$ reportados en las Figuras 38 y 39 y acorde con los promedios aritméticos globales calculados que se presentan en el Anexo VII y VIII (En estaciones, entre estaciones y de trayecto completo), se presume una mayor exposición personal a $PM_{2.5}$ con valores de 15.1 a 144.5 $\mu g m^{-3}$ en la línea 1 del Metrobús comparada con aquella determinada de 16.5 a 71.9 $\mu g m^{-3}$ en la línea 2 del mismo.

4.3 Comparación entre transportes, estudios previos y normatividad

Con base en los datos obtenidos en las campañas de muestreo y descritos en el Anexo IX y X, se presume una menor exposición a $PM_{2.5}$ de Norte a Sur de la ZMVM en el Metro con valores promedio de entre 8.3 y 38.5 $\mu g m^{-3}$, en comparación con la correspondiente a valores entre 15.1 y 144.5 $\mu g m^{-3}$ observada en el Metrobús. De forma similar, en las rutas de Este a Oeste de la ZMVM, los niveles de exposición a $PM_{2.5}$ observados sugieren una mayor exposición a $PM_{2.5}$ en el Metrobús con valores promedio de entre 16.5 y 71.9 $\mu g m^{-3}$, en comparación con los valores promedio de la exposición de entre 13.8 y 39.8 $\mu g m^{-3}$ registrados en el Metro.

En un contexto internacional, los niveles de exposición a $PM_{2.5}$ observados en Metrobús de la ZMVM, son similares y oscilan en el rango de 7.9 a 97.4 $\mu g m^{-3}$ como los medidos en el Centro de Londres en autobús por Adams et al. (2001), mientras que para metro en la ZMVM son menores que los reportados para Londres de 105.3 a 371.2 $\mu g m^{-3}$. En contraste, Okokon et al. (2017) reportaron niveles superiores de exposición a $PM_{2.5}$ de en promedio 85 $\mu g m^{-3}$ en autobús en Tesalónica, Grecia con referencia a los medidos en el Metrobús de la ZMVM. Sin embargo, un estudio previo realizado por el Instituto de Ecología (INE, 2006), reportó que en otoño del 2005 el promedio de concentración de $PM_{2.5}$ en la Línea 1 del Metrobús en la mañana fue de 111 $\mu g m^{-3}$, ligeramente superior al promedio de invierno de 2017 de 100.7 $\mu g m^{-3}$ y notablemente superior al de primavera de 2018 de 38.1 $\mu g m^{-3}$, ambos reportados en el presente proyecto respectivamente. Ello sugiere que la exposición a $PM_{2.5}$ a lo largo de la Av. Insurgentes ha disminuido de forma clara.

Aunque no es posible realizar una comparación de los niveles de exposición a $PM_{2.5}$ observados en el presente estudio contra los valores permisibles en las normas de calidad del aire vigentes aplicables (sección 1.6), ya que estas sólo aplican a mediciones en sitios de monitoreo fijos. Además, dicha normatividad considera exposición promedio de 24 horas y de promedio anual, mientras que los usuarios del metro y Metrobús registraron en promedio una exposición de hasta dos horas por día. Sin embargo, la NOM-010-STPS-2014 para ambientes interiores puede ser considerada para la exposición de los operadores de los transportes evaluados, ya que los mismos si permanecen por periodos de hasta 8 h (una jornada laboral) como se especifica en dicha norma.

El Anexo XII presenta el cálculo de exposición a $PM_{2.5}$ para los conductores del Metro y Metrobús considerando un promedio de 8 h de exposición para que sean comparados con los valores límites de Exposición de la NOM-010-STPS-2014. En los recorridos de norte a sur, el Metrobús L1 sugiere la menor y mayor exposición estimada a 8 h de 28 a $267 \mu g m^{-3}$ considerando promedios de cada recorrido, respectivamente, mientras que para promedios globales, dichos valores oscilan entre 78.5 y $33.1 \mu g m^{-3}$. Para los recorridos de este a oeste, el metro L1 mostró la mayor exposición a 8 h ($182.9 \mu g m^{-3}$) y el Metrobús la menor ($30.9 \mu g m^{-3}$) considerando exposición por cada viaje, y para los promedios el Metrobús L2 mostró la mayor exposición ($49.7 \mu g m^{-3}$) y el metro L1 la menor ($41.3 \mu g m^{-3}$). Considerando que la totalidad del $PM_{2.5}$ observado fuera emitido de la combustión de diésel y tuviera su misma composición, para el cual la STPS establece un valor máximo de exposición de $100 mg m^{-3}$ en 8 h, los valores reportados en el presente trabajo son menores entre 4 y 5 órdenes de magnitud. No obstante, para realizar una comparación directa, se recomienda realizar la caracterización de las partículas suspendidas a que se exponen los usuarios de las rutas evaluadas, lo que permitiría comparar contra alguno de los compuestos establecidos por la STPS.

5 CONCLUSIONES

En el presente estudio se evaluaron las concentraciones de exposición personal a $PM_{2.5}$ en microambientes de transporte de la Ciudad de México. Se realizaron mediciones de los niveles ambiente de $PM_{2.5}$ en las rutas 1 y 3 del Metro y, 1 y 2 del Metrobús las cuales transitan de Norte-Sur y Este-Oeste dentro de la ZMVM. Se observó que las concentraciones de $PM_{2.5}$ medidas en las campañas de muestreo variaron significativamente según el medio de transporte, temporada y ruta.

En las rutas del metro, las mayores concentraciones de $PM_{2.5}$ se registraron en el horario de mediodía, mientras que en el Metrobús se observaron por la mañana. Dichos niveles sugieren que la exposición personal a $PM_{2.5}$ en Metrobús puede estar influenciada mayoritariamente por fuentes antropogénicas, y en particular por emisiones vehiculares, ya que los niveles observados fueron superiores a aquellos registrados durante el pico actividad fotoquímica y producción secundaria. Por el contrario, los niveles de $PM_{2.5}$ en el metro siguieron los ciclos diarios típicos observados en sitios de monitoreo, lo que sugiere que no existe una influencia directa del tráfico vehicular sobre las concentraciones durante las horas pico.

Por otro lado, se observaron mayores niveles de $PM_{2.5}$ durante la temporada seca caliente en ambos medios de transporte que durante la temporada seca fría. Tal comportamiento se encuentra relacionado con las condiciones ambientales de cada estación, ya que, durante la temporada seca fría, registros históricos mencionan que precipitación eventual y fuertes vientos tienen efectos de disminución de los niveles ambiente de $PM_{2.5}$.

Las variaciones espaciales en la concentración de $PM_{2.5}$ observadas sugieren que los niveles de exposición varían según la movilidad de los usuarios, la zona y trayectos de traslado, así como velocidad del transporte, horario y medio de transporte. Por lo cual, la información obtenida en el presente estudio puede servir para orientar a las autoridades durante el diseño de estrategias de mitigación de la exposición a $PM_{2.5}$ con miras a lograr reducciones en la misma. Además, dicha

información podría también ser usada para el diseño y/o modificación de mobiliario urbano como carriles confinados y rutas de transporte público.

Finalmente, la información obtenida muestra que hay variaciones significativas entre sistemas de transporte y rutas de transporte por lo cual es necesario continuar con el monitoreo de la exposición no sólo de $PM_{2.5}$ sino también de otros contaminantes para proveer a la población información confiable, en particular a aquella vulnerable, para proteger la salud de los usuarios del transporte público.

6 REFERENCIAS

1. Adams, H., Nieuwenhuijsen, M., Colvile, R., McMullen, M., & Khandelwal, P. (2001). Determinants of fine particle (PM_{2.5}) personal exposure levels. *Science of the Total Environment*, 279(1-3), 29-44. Obtenido de [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(01\)00723-9](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(01)00723-9)
2. Adams, H., Nieuwenhuijsen, M., Colvile, R., McMullen, M., & Khandelwal, P. (2001). Fine particle (PM_{2.5}) personal exposure levels in transport microenvironments, London, UK. *Science of the Total Environment*, 279(1-3), 29-44. Obtenido de [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(01\)00723-9](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(01)00723-9)
3. Allen, D., & Olaguer, E. (31 de July de 2004). *State of the science of air quality in eastern Texas:Major scientific findings and recommendations*. (T. E. Consortium, Ed.) Recuperado el 3 de Febrero de 2018, de <http://aqrp.ceer.utexas.edu/docs/State%20of%20the%20Science%20July%2031%202004.pdf>
4. ATSDR. (2009). *Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades*. Recuperado el 09 de Enero de 2019, de Modulo III. Introducción a la Evaluación del riesgo: https://www.atsdr.cdc.gov/es/training/toxicology_curriculum/modules/3/es_module3.html
5. Camak, S., Dales, R., & Vida, C. B. (2009). Components of particulate air pollution and mortality in Chile. *International Journal of Occupational and Environmental Health.*, 15(2), 152-158. doi: 10.1179/oeh.2009.15.2.152
6. Chen, L. C., & Lippmann, M. (2009). Effects of metals within ambient air particulate matter (PM) on human health. *Inhalation toxicology*, 21(1), 1-31. doi: 10.1080/08958370802105405

7. Falcon-Rodríguez, C., Osornio-Vargas, A., Sada-Ovalle, I., & Segura-Medina, P. (2016). Aeroparticles, composition, and lung diseases. *Frontiers in immunology*, 7, 3. Obtenido de <https://doi.org/10.3389/fimmu.2016.00003>
8. Friedman, M. S., Powell, K. E., Hutwagner, L., L. Graham, L. M., & Teague, W. G. (21 de Febrero de 2001). Impact of changes in transportation and commuting behaviors during the 1996 Summer Olympic Games in Atlanta on air quality and childhood asthma. *Jama*, 285(7), 897-905. doi:10.1001/jama.285.7.897
9. Heal, M. R., Kumar, P., & Harrison, R. M. (2012). Particles, Air Quality, Policy and Health. *Chemical Society Reviews* , 41, 6606-6630. doi:10.1039/C2CS35076A
10. Heinrich, J., & Slama, R. (31 de Octubre de 2007). Fine particles, a major threat to children. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 210(5), 617-622. doi: 10.1016/j.ijheh.2007.07.012
11. INE & CTS. (2006). *Evaluación de los beneficios en la exposición personal de pasajeros por la instrumentación de cambios en el transporte público*. México: INE (Instituto Nacional de Ecología) y CTS (Centro de Transporte Sustentable). Recuperado el 13 de Septiembre de 2018, de [https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/35980582/inf_final_metrobus_2005.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1539646126&Signature=QCDovyHd7IzyWHZpnUZPtarYNAU%3D&response-content-](https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/35980582/inf_final_metrobus_2005.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1539646126&Signature=QCDovyHd7IzyWHZpnUZPtarYNAU%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DEvaluacion_de_los_bene)
disposition=inline%3B%20filename%3DEvaluacion_de_los_bene
12. INEGI. (2015). *Cuaderno estadístico y geográfico de la Zona Metropolitana del Valle de México 2014*. México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Recuperado en Noviembre de 2018, de http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/valle_mex/702825068318.pdf

13. INEGI. (2017). *Anuario estadístico y geográfico de la Ciudad de México*. México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Recuperado el 20 de Noviembre de 2018, de https://www.datatur.sectur.gob.mx/ITxEF_Docs/CDMX_ANUARIO_PDF.pdf
14. INEGI. EOD (Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Encuesta de Origen-Destino). (2017). *Encuesta de Origen- Destino en Hogares de la Zona Metropolitana del Valle de México*. Recuperado el 26 de Abril de 2018, de http://www.beta.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2018/EstSociodemo/OrigenDest2018_02.pdf
15. MITECO (Ministerio para la transición ecológica). (2011). *Partículas*. (G. d. España, Editor) Recuperado el 15 de marzo de 2018, de <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/salud/particulas.aspx>
16. MITECO (Ministerio para la transición ecológica). (2011). *Partículas de suspensión*. (G. d. España, Editor) Recuperado el 14 de marzo de 2018, de <https://www.miteco.gob.es/va/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/emisiones/probamb/particulas.aspx>
17. Okokon, E. O., Yli-Tuomi, T., Turunen, A. W., Taimisto, P., Pennanen, A., Vouitsis, I., Samaras, Z., Voogt, M., Keuken, M., and Lanki, T. (2017). Particulates and noise exposure during bicycle, bus and car commuting: A study in three European cities. *Environmental Research*, 154, 181-189.
18. OMS (Organización Mundial de la Salud). (2006). *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre*. Obtenido de http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/69478/1/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf.

19. Ostro, B., Tobias, A., Querol, X., Alastuey, A., Amato, F., Pey, J., . . . Sunyer, J. (Diciembre de 2011). The Effects of Particulate Matter Sources on Daily Mortality: A Case-Crossover Study of Barcelona, Spain. *Environmental health perspectives*, 119(12), 1781-1787. doi:10.1289/ehp.1103618
20. Pascual, P. B. (2005). Retos futuros de la exposición personal a contaminantes en el aire. *Revista de Salud Ambiental*, 5(2), 175-180. Recuperado el 09 de Enero de 2019, de <http://ojs.diffundit.com/index.php/rsa/article/view/314>
21. Peters, A. (1 de Septiembre de 2005). Particulate matter and heart disease: Evidence from epidemiological studies. . *Toxicology and applied pharmacology*, 207, 477-482. doi:10.1016/j.taap.2005.04.030
22. Pope III, C. A., Burnett, R. T., Thun, M. J., Calle, E. E., Krewski, D., Ito, K., & Thurston, G. D. (6 de Marzo de 2002). Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. *Jama*, 287(6), 1132-1141. doi:10.1001/jama.287.9.1132
23. Portal oficial del metrobús de CDMX. (2018). *Metrobús de la CDMX. Mapas y Rutas*. Recuperado en Agosto de 2018, de <https://www.metrobus.cdmx.gob.mx>
24. Portal Oficial del STC de CDMX. (2018). *Sistema de transporte colectivo de la CDMX*. Recuperado el Agosto de 2018, de <http://www.metro.cdmx.gob.mx>
25. PROAIRE-CDMX. (2002). *Programa para Mejorar la Calidad del Aire en la Zona Metropolitana del Valle de México 2002-2010*. Recuperado en Junio de 2018, de http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/gestion-ambiental-aire-memoria-documental-2001-2006/descargas/proaire_2002-2010.pdf
26. PROAIRE. (2011). *Programa para Mejorar la Calidad del Aire en la Zona Metropolitana del Valle de México 2002-2010*. Recuperado en Junio de 2018, de <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/gestion->

ambiental-aire-memoria-documental-2001-2006/descargas/proaire_2002-2010.pdf

27. Quiros, D. C., Lee, E. S., Wang, R., & Zhu, Y. (2013). Ultrafine particle exposures while walking, cycling, and driving along an urban residential roadway. *Atmospheric environment*, 73, 185-194.
28. Sacks, J. D., Stanek, L. W., Luben, T. J., Johns, D. O., Buckley, B. J., Brown, J. S., & Ross, M. (Abril de 2011). Particulate Matter-Induced Health Effects: Who Is Susceptible? *Environ Health Perspect*, 119(4), 446-454. doi:10.1289/ehp.1002255
29. Schwarze, P. E., Ovrevik, J., Refsnes, M. M., Nafstad, P., Hetland, R. B., & Dybing, E. (2006). Particulate matter properties and health effects: consistency of epidemiological and toxicological studies. *Human & experimental toxicology*, 25(10), 559-579. doi: 10.1177/096032706072520
30. Secretaría del Medio Ambiente (SMA). (2008). *Proyecto Introducción de Medidas Ambientalmente Amigables en Transporte (PIMAAT). Programa de sustentabilidad del sistema de transporte de la CDMX*. México: Ambienco. Recuperado el 16 de Julio de 2018
31. SEDEMA (Secretaria del Medio Ambiente). (2017). *Monitoreo atmosférico: Calidad del aire en CDMX*. Recuperado el 2017, de <http://www.sedema.cdmx.gob.mx/>
32. SEDEMA CDMX (Secretaria del Medio Ambiente del Gobierno de la Ciudad de México). (2016). *Inventario de Emisiones de la CDMX 2014. Contaminantes criterio, tóxicos y de efecto invernadero*. Recuperado el Mayo de 2018, de <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/inventario-emisiones-cdmx2014-2/IE-CDMX-2014.pdf>

33. SEDEMA-CDMX (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México). (2017). *Calidad del aire en la Ciudad de México, Informe 2016*. Dirección de Monitoreo Atmosférico, Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire, Ciudad de México. Recuperado el 27 de Marzo de 2018, de http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/informe_anual_calidad_aire_2016v1/informe_anual_calidad_aire_2016.pdf
34. SEDEMA-CDMX (Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno de la Ciudad de México). (2016). *Inventario de Emisiones de la CDMX 2014. Contaminantes criterio, tóxicos y de efecto invernadero*. (SEDEMA, Ed.) Recuperado el 17 de Diciembre de 2017, de <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/inventario-emisiones-cdmx2014-2/IE-CDMX-2014.pdf>
35. SEDESOL/CONAPO/INEGI. (2012). *Delimitación de las zonas metropolitanas 2010*. México: Secretaría de Desarrollo social, Consejo Nacional de Población e Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
36. SEGOB (Secretaría de Gobernación). (2016). *Norma Oficial Mexicana NOM-010-STPS-2014, Agentes químicos contaminantes del ambiente laboral-Reconocimiento, evaluación y control*. Recuperado en Enero de 2019, de http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5342372&fecha=28/04/2014
37. SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales) . (2010). *Compendio de estadísticas ambientales 2010. Tipos de emisiones de contaminantes atmosféricos*. Recuperado en Septiembre de 2017, de http://aplicaciones.semarnat.gob.mx/estadisticas/compendio2010/10.100.13.5_8080/ibi_apps/WFServlete5c8.html
38. Smith, J., Mitsakou, C., Kitwiroon, N., Barrat, B., Walton, H., Taylor, J., & Beevers, S. (2016). London hybrid exposure model: Improving human exposure estimates to NO₂ and PM_{2.5} in an urban setting. *Environmental science & technology*, 50(21), 11760-11768. doi:10.1021/acs.est.6b01817

39. SSA (Secretaria de Salud). (2014). *NORMA Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014. Salud Ambiental. Valores límite permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM_{10} y $PM_{2.5}$ en el aire ambiente y criterios para su evaluación*. Recuperado en Noviembre de 2017, de http://bios.biologia.umich.mx/2016/monitoreo/nom_025_ssa1-2014.pdf
40. Vallejo, M., Lerma, C., Infante, O., G. Hermosillo, A., Rioja-Rodriguez, H., & Cárdenas, M. (2004). Personal exposure to particulate matter less than 2.5 μm in Mexico City: a pilot study. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 14(4), 323. doi:<https://doi.org/10.1038/sj.jea.7500328>

7 ANEXOS

ANEXO I. Metodología de calibración 0 de pDR

- 1) Conectar el cargador del pDR al enchufe.
- 2) Encender el equipo con el botón de encendido/apagado.
- 3) Poner el ciclón correspondiente, conectar la manguera en recirculación en el mismo equipo pDR para calibrar a 0.
- 4) En la pantalla principal, seleccionar “Operate”, con las flechas “▲▼” buscar la opción de “Zero Instrument Filter Ready”, presionar “Enter” y esperar hasta que el equipo indique que terminó la calibración zero.
- 5) Al terminar el proceso de calibración, retirar la manguera, apagar el equipo y desconectar el cargador.
- 6) Utilizar el equipo el día posterior para realizar las mediciones necesarias.

ANEXO II. Metodología de calibración de flujo pDR

- 1) Conectar al enchufe el cargador del pDR.
- 2) Realizar calibración 0 indicada en el Anexo I, para que se tengan buenas lecturas de concentración.
- 3) Posterior a la calibración 0, aplicar el ciclón correspondiente (el negro), el soporte del ciclón, conectar mangueras desde el pDR al gasómetro y un filtro.
- 4) Encender el pDR con el botón de encendido/apagado.
- 5) Seleccionar en la pantalla “Configure”, con las flechas “▲▼”, después buscar la opción de “Flow rate” y presionar “Enter” para establecer el flujo en LPM.
- 6) Ajustar la hora y fecha.
- 7) Presionar “ESC” hasta salir a la pantalla principal, seleccionar “Operate”, y buscar la opción “Start Run”.

- 8) Antes del arranque del equipo, registrar el flujo inicial que marca el gasómetro y tener a la mano un cronómetro para el registro del tiempo.
- 9) Presionar “Enter” en el pDR e iniciar el conteo del tiempo, realizar tres corridas diferentes con cinco datos cada una en intervalos de tiempo de 3, 5 y 7 minutos (tiempos establecidos para cada corrida).
- 10) Anotar el flujo en cada intervalo de tiempo establecido hasta obtener los cinco datos.
- 11) Al terminar la corrida, parar el equipo con el botón “ESC” y repetir el procedimiento planteado en los puntos anteriores.
- 12) Apagar el pDR y desconectar el cargador.
- 13) Pasar los datos de flujos y tiempo a un libro de Excel.
- 14) Realizar una hoja de cálculo en Excel donde se tenga: las diferencias de flujo en cada intervalo, la división entre el intervalo de tiempo en que se realizó el registro, el promedio de los flujos y el flujo real con el factor de corrección de pDR (debido a que el gasómetro funciona con gas natural o gas LP y es necesaria una corrección para el aire, el factor se encuentra en el manual del equipo), estos cálculos son necesarios en todas las corridas.
- 15) Realizar una interpolación entre los flujos reales calculados, para obtener el flujo que se desea para llevar a cabo las mediciones en el Sistema Colectivo de Transporte Metro y Metrobús.

ANEXO III. Metodología de uso de pDR (Medición)

- 1) Colocar 4 pilas AA, en el pDR
- 2) Colocar un nuevo filtro en el empaque con guantes y unas pinzas esterilizadas colocando la parte lisa del filtro hacia el interior del equipo. Acomodar cuidadosamente el empaque que contiene el filtro y cerrar bien la tapa donde se encuentra el filtro.
- 3) Cambiar el ciclón “Total Inlet”, por el ciclón “Blue Cyclone” (1-4 μm).
- 4) Colocar el soporte del ciclón, y conectar la manguera a la salida del mismo y ajustar la boquilla de alimentación a la altura de la nariz del voluntario.

- 5) Encender el equipo con el botón de encendido/apagado, para empezar a realizar las mediciones con la opción “Start Run”.

ANEXO IV. Metodología para descarga de datos pDR

Este procedimiento se realiza una vez finalizada la medición, posterior a la campaña de muestreo en el sistema de transporte.

- 1) Conectar el pDR a la computadora con el cable USB del equipo.
- 2) Encender el pDR.
- 3) Encender la computadora.
- 4) Abrir el programa correspondiente.
- 5) Dar click en “file” → “get data”.
- 6) Abrir el archivo correspondiente a las mediciones.
- 7) Guardar el archivo en la carpeta “Datos pDR”.
- 8) Abrir el archivo propio con los datos en un libro de Excel y guardar los datos.
- 9) Respalidar los datos en una carpeta compartida de Dropbox.
- 10) Cerrar el programa.
- 11) Apagar la computadora.
- 12) Desconectar el equipo.
- 13) Guardar el equipo.

ANEXO V. Instrucciones de uso del GPS

-Repetir procedimiento por trayecto

- 1) Cargar las pilas del equipo un día antes
- 2) Llevar también celular para hacer la comparación
- 3) Anotar la diferencia en hora con la computadora de escritorio
- 4) Encender
- 5) Presionar el botón superior hasta que encienda y dejar que detecte la posición
- 6) Presionar Menú dos veces seguidas para acceder al menú

- 7) Entrar a la opción Tracks dando clic en el botón ENTR
- 8) Verificar que la opción track log este ACTIVADA
- 9) Borrar el track log dando clic en borrar y confirmar (todo se confirma con el botón ENTR)
- 10) El equipo comenzará a guardar en la memoria el recorrido, y verificar continuamente la memoria del track log
- 11) Al terminar el recorrido guardar en el dispositivo la ruta que está en la memoria dando clic en Guard. ENTR y confirmar la fecha.
- 12) Al finalizar la campaña apagar equipo y proceder a descargar los datos con el programa correspondiente a partir de la memoria micro SD donde se respaldan automáticamente.

ANEXO VI. Instrucciones de uso de las cámaras

-Repetir procedimiento por trayecto

- 1) Cargar con anticipación las cámaras con cable USB.
- 2) Antes de la campaña de muestreo conectar cámara con cable USB a un ordenador, encender cámara con botón de encendido, esperar a que la computadora reconozca el dispositivo y abrir el programa correspondiente para sincronizar fecha y hora del equipo con la computadora de referencia, activar y apagar equipo.
- 3) Cuando se inicie la campaña, encender equipo con el botón correspondiente, y cuando se inicie el recorrido desplazar botón a rec hasta encender foco rojo y anotar la hora en la que fue activado rec. Cuando finalice el recorrido desplazar botón a stop, anotar hora y apagar equipo.
- 4) Al finalizar la campaña, descargar los videos con cable USB desde el programa correspondiente en la computadora y guardar.

ANEXO VII. Estadísticos de campaña de muestreo en temporada seca fría

A. METRO LÍNEA 1

Tabla I. Estadísticos por estación del Metro Línea 1 en la corrida de la mañana.

a) Trayecto de ida

Estación	Prom. PM_{2.5} (ug m⁻³)	Desv. Est.
Observatorio	23.9	0.9
Tacubaya	21.6	0.8
Juanacatlán	19.1	0.6
Chapultepec	21.3	0.8
Sevilla	24.2	0.4
Insurgentes	24.8	0.7
Cuauhtémoc	22.7	0.8
Balderas	22.9	0.5
Salto del Agua	25.5	0.8
Isabel la Católica	27.4	0.9
Pino Suárez	26.2	1.2
Merced	30.9	2.5
Candelaria	27.7	1.0
San Lázaro	23.9	1.2
Moctezuma	29.0	6.3
Balbuena	23.8	0.8
Boulevard Pto. Aéreo	21.9	0.8
Gómez Farías	23.4	1.4
Zaragoza	21.1	1.2
Pantitlán	20.4	0.7
En estaciones	25.7	5.2
Entre estaciones	23.4	3.4
Trayecto completo	24.5	4.4

b) Trayecto de regreso

Estación	Prom. PM_{2.5} (ug m⁻³)	Desv. Est.
Pantitlán	19.3	0.9
Zaragoza	19.7	0.6
Gómez Farías	24.9	1.1
Boulevard Pto. Aéreo	24.2	0.7
Balbuena	23.9	1.1
Moctezuma	27.3	0.9
San Lázaro	26.1	0.8
Candelaria	28.3	1.0
Merced	32.7	1.0
Pino Suárez	31.0	0.5
Isabel la Católica	33.0	1.1
Salto del Agua	33.8	0.9
Balderas	31.0	1.5
Cuauhtémoc	30.1	1.2
Insurgentes	29.2	1.1
Sevilla	26.4	0.9
Chapultepec	27.5	0.8
Juanacatlán	28.2	0.9
Tacubaya	30.0	0.9
Observatorio	34.6	0.8
En estaciones	28.0	3.9
Entre estaciones	28.1	4.1
Trayecto completo	28.1	4.0

Tabla II. Estadísticos por estación del Metro Línea 1 en la corrida del mediodía.

a) Trayecto de ida

Estación	Prom. PM_{2.5} (ug m⁻³)	Desv. Est.
Observatorio	33.2	6.2
Tacubaya	28.5	1.1
Juanacatlán	27.4	1.1
Chapultepec	29.2	0.5
Sevilla	26.7	1.1
Insurgentes	31.9	0.9
Cuauhtémoc	33.0	0.7
Balderas	34.1	1.0
Salto del Agua	35.0	0.9
Isabel la Católica	37.1	1.0
Pino Suárez	37.2	1.1
Merced	35.0	1.2
Candelaria	34.1	1.4
San Lázaro	33.9	0.9
Moctezuma	39.4	1.8
Balbuena	33.8	1.6
Boulevard Pto.		
Aéreo	32.0	1.1
Gómez Farías	36.1	1.0
Zaragoza	32.3	1.5
Pantitlán	32.2	0.8
En estaciones	33.8	3.9
Entre estaciones	33.1	3.8
Trayecto completo	33.3	3.9

b) Trayecto de regreso

Estación	Prom. PM_{2.5} (ug m⁻³)	Desv. Est.
Pantitlán	38.7	2.3
Zaragoza	32.9	0.8
Gómez Farías	39.9	0.7
Boulevard Pto.		
Aéreo	34.3	0.9
Balbuena	37.9	0.9
Moctezuma	41.2	1.0
San Lázaro	43.7	3.5
Candelaria	43.0	0.9
Merced	39.8	1.0
Pino Suárez	40.6	1.1
Isabel la Católica	44.8	1.0
Salto del Agua	44.9	1.0
Balderas	43.2	1.1
Cuauhtémoc	40.6	1.1
Insurgentes	41.6	0.9
Sevilla	41.1	1.1
Chapultepec	38.2	0.9
Juanacatlán	35.8	1.6
Tacubaya	33.1	0.8
Observatorio	45.0	0.9
En estaciones	39.8	3.5
Entre estaciones	38.9	4.3
Trayecto completo	39.1	4.2

Tabla III. Estadísticos por estación del Metro Línea 1 en la corrida de la tarde.

a) Trayecto de ida

b) Trayecto de regreso

Estación	Prom. PM_{2.5} (ug m⁻³)	Desv. Est.	Estación	Prom. PM_{2.5} (ug m⁻³)	Desv. Est.
Observatorio	12.5	1.7	Pantitlán	7.5	1.0
Tacubaya	17.7	0.7	Zaragoza	8.9	0.6
Juanacatlán	14.8	0.9	Gómez Farías	8.4	0.9
Chapultepec	14.5	0.6	Boulevard Pto.		
Sevilla	14.3	0.6	Aéreo	18.9	1.5
Insurgentes	17.0	0.6	Balbuena	15.9	0.7
Cuauhtémoc	14.4	0.8	Moctezuma	13.9	0.8
Balderas	13.0	0.9	San Lázaro	12.5	0.6
Salto del Agua	10.7	0.7	Candelaria	9.5	0.8
Isabel la Católica	10.7	0.5	Merced	12.6	1.0
Pino Suárez	11.1	0.8	Pino Suárez	11.6	0.8
Merced	13.7	0.8	Isabel la Católica	9.6	0.8
Candelaria	11.9	0.7	Salto del Agua	8.3	0.9
San Lázaro	11.8	0.8	Balderas	17.4	1.4
Moctezuma	14.4	0.7	Cuauhtémoc	15.1	0.8
Balbuena	16.9	0.9	Chapultepec	39.6	1.3
Boulevard Pto.			Insurgentes	101.2	21.5
Aéreo	21.6	0.8	Sevilla	103.4	6.7
Gómez Farías	18.4	0.7	Juanacatlán	39.3	1.6
Zaragoza	12.7	0.8	Tacubaya	25.4	1.6
Pantitlán	9.6	1.1	Observatorio	17.8	0.7
En estaciones	13.8	2.8	En estaciones	25.3	31.3
Entre estaciones	14.3	3.0	Entre estaciones	23.7	26.4
Trayecto completo	14.2	2.9	Trayecto completo	24.1	28.0

B. METRO LÍNEA 3

Tabla IV. Estadísticos por estación del Metro Línea 3 en la corrida de la mañana.

a) Trayecto de ida

Estación	Prom. PM _{2.5} (ug m ⁻³)	Desv. Est.
Indios Verdes	29.1	1.1
Deportivo 18 de marzo	29.9	4.1
Potrero	22.2	0.7
La Raza	19.2	0.7
Tlatelolco	15.6	0.8
Guerrero	16.2	0.7
Hidalgo	18.2	0.8
Juárez	18.6	0.9
Balderas	16.5	0.5
Niños Héroes	17.4	0.7
Hospital General	15.8	0.4
Centro Médico	15.8	0.5
Etiopía	17.6	0.8
Eugenia	21.4	0.6
División del Norte	21.1	0.8
Zapata	16.7	0.7
Coyoacán	14.3	0.7
Viveros	18.3	0.5
Miguel Ángel De Quevedo	21.9	0.6
Copilco	16.7	2.3
Universidad	15.2	0.7
En estaciones	21.8	6.2
Entre estaciones	18.6	4.3
Trayecto completo	19.2	4.9

b) Trayecto de regreso

Estación	Prom. PM _{2.5} (ug m ⁻³)	Desv. Est.
Universidad	9.5	0.6
Copilco	13.8	0.8
Miguel Ángel De Quevedo	18.0	0.5
Viveros	19.4	0.5
Coyoacán	15.3	0.7
Zapata	12.3	0.6
División del Nte.	11.1	0.6
Eugenia	12.3	0.8
Etiopía	11.5	0.6
Centro Médico	11.8	0.4
Hospital General	11.5	0.5
Niños Héroes	11.5	0.6
Balderas	16.7	3.3
Juárez	14.1	0.7
Hidalgo	13.1	0.6
Guerrero	15.2	0.7
Tlatelolco	13.1	0.6
La Raza	14.5	0.4
Potrero	17.5	1.7
Deportivo 18 de marzo	18.8	0.8
Indios Verdes	28.0	2.3
En estaciones	14.2	3.7
Entre estaciones	15.1	4.2
Trayecto completo	14.9	4.1

Tabla V. Estadísticos por estación del Metro Línea 3 en la corrida del mediodía.

a) Trayecto de ida

b) Trayecto de regreso

Estación	Prom. PM_{2.5} (ug m⁻³)	Desv. Est.	Estación	Prom. PM_{2.5} (ug m⁻³)	Desv. Est.
Universidad	17.2	1.2	Indios Verdes	11.1	1.3
Copilco	20.7	5.7	Deportivo 18 de marzo	12.5	0.9
Miguel Ángel De Quevedo	32.1	5.7	Potrero	11.8	1.3
Viveros	27.3	1.2	La Raza	11.0	0.8
Coyoacán	22.8	0.7	Tlatelolco	8.9	0.8
Zapata	19.1	0.6	Guerrero	10.4	1.1
División del Norte	18.7	0.8	Hidalgo	11.7	0.9
Eugenia	19.9	0.6	Juárez	12.5	0.6
Etiopía	22.0	0.8	Balderas	12.0	0.8
Centro Médico	18.4	1.0	Niños Héroes	12.1	0.8
Hospital General	17.2	0.7	Hospital General	11.0	0.9
Niños Héroes	14.8	1.2	Centro Médico	10.2	0.7
Balderas	14.7	1.1	Etiopía	11.0	0.7
Juárez	13.4	0.8	Eugenia	11.6	0.5
Hidalgo	13.1	0.8	División del Norte	12.4	0.6
Guerrero	11.5	0.7	Zapata	10.8	0.7
Tlatelolco	10.7	0.9	Coyoacán	10.7	0.8
La Raza	10.0	0.5	Viveros	22.7	4.9
Potrero	13.5	0.7	Miguel Ángel De Quevedo	24.4	0.9
Deportivo 18 de Marzo	15.6	0.7	Copilco	11.4	0.5
Indios Verdes	11.4	1.5	Universidad	10.3	0.6
En estaciones	18.6	6.0	En estaciones	11.7	3.7
Entre estaciones	17.2	4.8	Entre estaciones	12.4	4.2
Trayecto completo	17.6	5.1	Trayecto completo	12.3	4.1

Tabla VI. Estadísticos por estación del Metro Línea 3 en la corrida de la tarde.

a) Trayecto de ida

b) Trayecto de regreso

Estación	Prom. PM_{2.5} (ug m⁻³)	Desv. Est.	Estación	Prom. PM_{2.5} (ug m⁻³)	Desv. Est.
Universidad	4.6	0.6	Indios Verdes	7.4	0.9
Copilco	8.1	0.5	Deportivo 18 de marzo	8.0	0.7
Miguel Ángel De Quevedo	13.2	0.6	Potrero	7.8	0.8
Viveros	12.8	0.8	La Raza	8.2	0.9
Coyoacán	10.1	0.7	Tlatelolco	6.8	1.5
Zapata	11.2	0.8	Guerrero	7.7	0.6
División del Norte	9.8	0.4	Hidalgo	9.3	0.8
Eugenia	8.0	0.7	Juárez	8.9	0.6
Etiopía	7.1	0.6	Balderas	7.8	0.5
Centro Médico	7.4	0.6	Niños Héroes	7.3	0.7
Hospital General	9.3	0.7	Hospital General	8.0	0.7
Niños Héroes	7.6	0.7	Centro Médico	17.6	4.5
Balderas	8.2	0.8	Etiopía	24.4	0.8
Juárez	9.7	0.8	Eugenia	27.9	2.5
Hidalgo	10.0	0.8	División del Norte	19.6	1.5
Guerrero	7.9	0.8	Zapata	13.7	0.4
Tlatelolco	7.0	0.5	Coyoacán	10.5	0.7
La Raza	8.1	0.7	Viveros	16.7	0.6
Potrero	8.1	0.6	Miguel Ángel De Quevedo	16.4	0.6
Deportivo 18 de marzo	7.2	1.0	Copilco	7.9	1.1
Indios Verdes	9.9	1.6	Universidad	5.7	1.0
En estaciones	8.5	1.8	En estaciones	12.8	6.5
Entre estaciones	8.3	2.0	Entre estaciones	12.4	8.8
Trayecto completo	8.4	1.9	Trayecto completo	12.5	8.3

C. METROBÚS LÍNEA 1

Tabla VII. Estadísticos por estación del Metrobús Línea 1 en la corrida de la mañana.

a) Trayecto de ida

Estación	Prom. PM_{2.5} (ug m⁻³)	Desv. Est.
El Caminero	175.1	8.7
La Joya	155.9	21.2
Santa Úrsula	124.6	17.5
Fuentes Brotantes	137.1	17.8
Ayuntamiento	175.5	353.5
Corregidora	30.3	1.1
Villa olímpica	60.8	17.0
Perisur	85.3	19.2
CCU	90.7	39.8
Ciudad Universitaria	154.6	35.6
Doctor Gálvez	73.0	18.7
La bombilla	163.3	10.9
Altavista	149.3	22.2
Olivo	115.4	8.2
Francia	192.2	8.0
José María Velasco	114.9	3.6
Teatro insurgentes	249.2	17.1
Río Churubusco	204.3	13.4
Félix Cuevas	190.9	22.5
Parque hundido	100.4	11.1
Cd. De los deportes	164.7	4.8
Col. Del valle	152.5	27.2
Nápoles	225.5	15.0
Poliforum	201.4	17.5
La piedad	86.0	53.9
Nuevo León	95.6	16.8
Chilpancingo	234.3	51.3
Campeche	247.1	16.3
Sonora	251.0	21.7
Álvaro Obregón	168.5	8.2
Durango	147.7	28.8
Glorieta de Insurgentes	109.4	3.6
Hamburgo	138.9	8.4
Reforma	200.2	32.0
Plaza de la República	220.6	7.4
Revolución	169.2	4.8
El chopo	117.8	11.3
Buenavista	70.9	13.4
Manuel González	264.5	35.9
San Simón	192.9	6.5
Círculo	81.7	6.9
La Raza	55.0	3.0
Potrero	60.2	3.0
Euzkaro	53.5	11.8
Deportivo 18 de Marzo	97.1	13.1
Indios Verdes	57.9	3.1
En estaciones	144.5	89.2
Entre estaciones	143.2	65.4
Trayecto completo	143.4	69.2

b) Trayecto de regreso

Estación	Prom. PM_{2.5} (ug m⁻³)	Desv. Est.
Indios Verdes	17.4	1.6
Deportivo 18 de Marzo	98.4	5.9
Euzkaro	81.8	6.7
Potrero	87.1	1.5
La Raza	64.2	5.3
Círculo	50.6	10.6
San Simón	57.0	2.9
Manuel González	52.1	2.7
Buenavista	74.1	8.5
El Chopo	63.3	15.6
Revolución	64.9	5.1
Plaza de la República	56.6	4.6
Reforma	55.2	3.5
Hamburgo	47.0	5.5
Durango	35.8	3.3
Álvaro Obregón	86.0	6.5
Sonora	51.9	2.9
Campeche	85.4	14.7
Chilpancingo	113.3	7.1
Nuevo León	71.8	7.4
La piedad	29.7	1.3
Poliforum	70.3	8.9
Nápoles	31.8	2.4
Col. Del Valle	63.1	1.3
Cd. De los Deportes	48.2	5.3
Parque Hundido	46.6	4.7
Félix Cuevas	41.3	5.9
Río Churubusco	103.4	11.8
Teatro Insurgentes	53.6	4.6
José María Velasco	59.3	3.9
Francia	54.9	4.4
Olivo	50.0	3.8
Altavista	29.9	2.0
La Bombilla	53.3	3.5
Doctor Gálvez	47.0	4.1
Ciudad Universitaria	18.8	0.9
CCU	20.7	0.6
Perisur	20.9	1.5
Villa Olímpica	23.5	3.7
Corregidora	31.8	7.9
Ayuntamiento	31.5	1.2
Fuentes Brotantes	47.8	45.3
Santa Úrsula	41.5	3.8
La Joya	40.2	3.5
El Caminero	7.8	0.2
En estaciones	55.7	27.3
Entre estaciones	58.2	30.4
Trayecto completo	58.0	30.1

Tabla VIII. Estadísticos por estación del Metrobús Línea 1 en la corrida de la tarde.

a) Trayecto de ida

Estación	Prom. PM_{2.5} (ug m⁻³)	Desv. Est.
El Caminero	18.1	0.8
La joya	24.2	1.1
Santa Úrsula	31.1	0.3
Fuentes Brotantes	28.3	1.1
Ayuntamiento	24.7	0.8
Corregidora	21.5	1.0
Villa Olímpica	28.6	1.3
Perisur	28.3	2.3
CCU	25.7	0.7
Ciudad Universitaria	20.6	1.6
Doctor Gálvez	15.5	0.7
La Bombilla	15.5	0.6
Altavista	15.2	0.8
Olivo	20.8	1.2
Francia	22.6	1.8
José María Velasco	19.9	1.3
Teatro Insurgentes	14.8	0.8
Rio Churubusco	14.9	2.0
Félix Cuevas	11.8	0.7
Parque Hundido	13.8	1.1
Cd. De los Deportes	17.5	1.0
Col. del Valle	23.0	1.0
Nápoles	22.2	1.1
Poliforum	18.8	0.9
La piedad	12.2	0.7
Nuevo León	11.8	0.7
Chilpancingo	15.7	1.1
Campeche	19.4	1.0
Sonora	22.6	1.3
Álvaro Obregón	15.0	0.8
Durango	15.3	0.7
Glorieta de Insurgentes	12.7	1.0
Hamburgo	9.2	1.0
Reforma	11.5	0.8
Plaza de la República	18.8	1.0
Revolución	21.8	1.8
El Chopo	18.0	1.3
Buenavista	12.9	0.6
Manuel González	17.5	1.0
San Simón	21.2	1.1
Circuito	22.4	2.5
La Raza	17.2	1.3
Potrero	20.4	0.9
Euzkaro	18.8	1.0
Deportivo 18 de Marzo	21.6	1.1
Indios Verdes	24.0	0.6
En estaciones	18.6	5.1
Entre estaciones	17.7	13.7
Trayecto Completo	17.8	13.1

b) Trayecto de regreso

Estación	Prom. PM_{2.5} (ug m⁻³)	Desv. Est.
Indios Verdes	13.5	1.2
Deportivo 18 de Marzo	9.8	0.8
Euzkaro	9.0	0.8
Potrero	7.8	0.7
La Raza	8.5	1.2
Circuito	8.8	0.6
San Simón	9.2	0.6
Manuel González	8.7	0.6
Buenavista	11.4	0.5
El Chopo	10.4	0.6
Revolución	8.6	0.5
Plaza de la República	18.1	1.8
Reforma	17.0	0.6
Hamburgo	13.5	0.8
Durango	16.2	1.5
Álvaro Obregón	11.2	0.6
Sonora	10.2	0.4
Campeche	12.3	0.9
Chilpancingo	10.9	0.8
Nuevo León	10.8	0.9
La Piedad	15.6	0.7
Poliforum	18.7	0.7
Nápoles	16.0	0.6
Col. del Valle	13.7	0.7
Cd. de los Deportes	12.2	1.3
Parque Hundido	12.5	0.6
Félix Cuevas	32.0	1.6
Rio Churubusco	25.6	1.1
Teatro Insurgentes	19.8	1.2
José María Velasco	15.9	0.8
Francia	13.1	0.9
Olivo	13.4	0.4
Altavista	13.4	1.0
La Bombilla	15.8	0.5
Doctor Gálvez	22.9	0.9
Ciudad Universitaria	21.8	2.3
CCU	19.4	0.8
Perisur	22.4	1.6
Villa Olímpica	19.9	1.3
Corregidora	17.2	1.3
Ayuntamiento	18.1	1.0
Fuentes Brotantes	21.6	1.0
Santa Úrsula	21.5	1.6
La Joya	14.4	0.6
En estaciones	15.1	5.4
Entre estaciones	15.7	5.4
Trayecto completo	15.7	5.4

D. METROBÚS LÍNEA 2

Tabla IX. Estadísticos por estación del Metrobús Línea 2 en la corrida de la mañana.

a) Trayecto de ida

Estación	Prom. PM _{2.5} (ug m ⁻³)	Desv. Est.
Tacubaya	38.1	5.6
Antonio Maceo	43.4	0.7
De la Salle	39.6	1.6
Patriotismo	45.3	0.9
Escandón	50.3	0.8
Nuevo León	59.2	4.1
Viaducto	54.7	1.7
Amores	43.9	3.7
Etiopía	46.1	0.8
Dr. Vértiz	39.0	0.3
Centro SCOP	29.3	2.2
Álamos	37.1	0.5
Xola	33.8	0.4
Las Américas	38.2	0.8
Andrés Molina	38.5	1.0
La Viga	39.5	2.0
Coyuya	35.0	1.0
Canela	36.8	0.8
Tlacotal	31.1	0.6
Goma	32.5	0.7
Iztacalco	35.1	1.0
UPIICSA	29.0	1.3
El rodeo	29.2	0.7
Río Tecolutla	30.8	0.6
Río Mayo	37.0	4.3
Rojo Gómez	34.5	1.2
Del Moral	29.2	0.3
Leyes de Reforma	33.7	0.7
CCH Oriente	35.5	1.0
Const. de Apatzingán	39.0	0.5
Canal de San Juan	36.6	1.3
Nicolás Bravo	32.1	1.6
Gral. A. de León	30.4	1.4
En estaciones	38.1	7.8
Entre estaciones	38.0	7.5
Trayecto completo	38.0	7.5

b) Trayecto de regreso

Estación	Prom. PM _{2.5} (ug m ⁻³)	Desv. Est.
Nicolás Bravo	29.7	0.7
Gral. A. de León	30.2	0.5
Const. de Apatzingán	32.6	0.6
CCH Oriente	32.6	0.8
Leyes de Reforma	30.3	0.6
Río Frío	30.1	0.9
Rojo Gómez	29.2	0.8
Río Mayo	29.3	0.6
Río Tecolutla	30.1	0.9
El Rodeo	34.4	0.6
UPIICSA	29.5	0.5
Iztacalco	31.6	0.6
Goma	32.9	0.6
Tlacotal	36.3	0.7
Canela	37.2	0.6
Coyuya	36.9	1.0
La Viga	42.2	1.2
Andrés Molina	40.3	0.5
Las Américas	45.0	0.7
Xola	40.5	0.7
Álamos	40.6	0.5
Centro SCOP	36.6	0.6
Dr. Vértiz	31.4	1.9
Etiopía	26.5	1.4
Amores	18.9	1.2
Viaducto	17.8	0.4
Nuevo León	16.2	1.0
Escandón	17.3	0.4
Patriotismo	19.9	0.6
De la Salle	19.8	0.3
Parque Lira	17.8	0.8
Tacubaya	12.2	0.6
En estaciones	28.7	8.3
Entre estaciones	30.3	8.6
Trayecto completo	30.2	8.6

Tabla X. Estadísticos por estación del Metrobús Línea 2 en la corrida de la tarde.

a) Trayecto de ida

Estación	Prom. PM_{2.5} (ug m⁻³)	Desv. Est.
Tacubaya	20.0	2.6
Antonio Maceo	19.2	1.1
De la Salle	19.6	1.3
Patriotismo	28.8	2.5
Escandón	21.2	0.9
Nuevo León	26.8	2.1
Viaducto	21.1	1.3
Amores	21.7	1.2
Etiopía	38.3	2.5
Dr. Vértiz	28.7	1.6
Centro SCOP	20.8	1.1
Álamos	25.4	2.7
Xola	19.4	1.1
Las Américas	27.3	5.0
Andrés Molina	16.9	1.8
La Viga	32.7	6.1
Coyuya	20.6	1.5
Canela	20.3	1.3
Tlacotal	16.3	1.3
Goma	22.2	1.9
Iztacalco	22.9	1.2
UPIICSA	17.5	1.4
El rodeo	24.9	1.0
Río Tecolutla	18.2	1.2
Río Mayo	20.4	2.0
Del Moral	20.0	2.1
Leyes de Reforma	22.0	1.3
CCH Oriente	25.9	1.6
Const. de Apatzingán	21.3	1.5
Canal de San Juan	24.0	0.8
Nicolás Bravo	26.8	1.5
En estaciones	23.3	5.5
Entre estaciones	20.5	5.4
Trayecto completo	20.7	5.5

b) Trayecto de regreso

Estación	Prom. PM_{2.5} (ug m⁻³)	Desv. Est.
Gral. A. de León	15.6	0.6
Nicolás Bravo	15.6	1.3
Const. de Apatzingán	16.5	0.6
Leyes de Reforma	15.1	0.6
CCH Oriente	17.4	0.6
Río Frío	14.2	0.5
Rojo Gómez	14.6	0.6
Río Mayo	15.2	0.6
Río Tecolutla	15.8	0.4
El rodeo	14.4	0.8
UPIICSA	17.6	1.3
Iztacalco	14.3	0.6
Goma	16.1	0.7
Tlacotal	15.7	1.2
Canela	14.5	0.4
Coyuya	12.8	0.4
La Viga	13.2	0.4
Andrés Molina	14.0	0.4
Las Américas	14.6	1.1
Xola	14.4	1.0
Álamos	13.6	0.5
Centro SCOP	13.0	0.7
Dr. Vértiz	16.3	0.6
Etiopía	14.8	0.6
Amores	20.4	0.6
Viaducto	19.0	1.0
Nuevo León	17.4	0.6
Escandón	16.4	0.4
Patriotismo	18.0	1.0
De la Salle	16.8	0.8
Parque Lira	15.6	0.9
Tacubaya	34.5	7.1
En estaciones	16.5	4.6
Entre estaciones	17.0	4.0
Trayecto completo	16.9	4.1

ANEXO VIII. Estadísticos de campaña de muestreo en temporada seca caliente

A. METRO LÍNEA 1

Tabla XI. Datos estadísticos por estación del Metro Línea 1 en la corrida de la mañana

a) Trayecto de ida

b) Trayecto de regreso

Estación	Prom. PM_{2.5} (ug m⁻³)	Desv. Est.	Estación	Prom. PM_{2.5} (ug m⁻³)	Desv. Est.
Observatorio	16.0	1.6	Pantitlán	14.0	0.9
Tacubaya	28.8	1.9	Zaragoza	14.0	0.7
Chapultepec	16.4	0.7	Gómez Farías	14.7	0.5
Sevilla	15.3	0.8	Puerto aéreo	16.1	0.7
Insurgentes	14.6	1.0	Balbuena	15.1	0.6
Cuauhtémoc	17.7	1.0	Moctezuma	15.4	0.8
Balderas	16.3	1.6	San Lázaro	14.2	0.5
Salto del agua	13.6	1.0	Candelaria	14.5	1.1
Isabel la católica	13.1	0.8	Merced	16.4	0.7
Pino Suárez	15.3	1.1	Pino Suárez	14.3	0.6
Merced	19.1	0.9	Isabel la católica	17.6	1.0
Candelaria	19.0	0.7	Salto del agua	21.8	0.9
San Lázaro	16.1	1.1	Balderas	17.4	0.7
Moctezuma	22.1	2.3	Cuauhtémoc	18.9	1.0
Balbuena	21.8	0.9	Insurgentes	22.6	0.9
Puerto aéreo	22.7	1.2	Sevilla	20.8	0.6
Gómez Farías	20.0	1.1	Chapultepec	20.0	0.7
Zaragoza	17.3	1.5	Juanacatlán	23.5	0.5
Pantitlán	15.8	1.5	Tacubaya	22.7	0.7
En estaciones	19.8	3.9	Observatorio	40.1	0.4
Entre estaciones	17.9	4.0	En estaciones	16.0	3.1
Trayecto completo	18.5	3.9	Entre estaciones	18.1	4.2
			Trayecto completo	17.5	4.0

Tabla XII. Estadísticos por estación del Metro Línea 1 en la corrida del mediodía.

a) Trayecto de ida

b) Trayecto de regreso

Estación	Prom. PM_{2.5} (ug m⁻³)	Desv. Est.	Estación	Prom. PM_{2.5} (ug m⁻³)	Desv. Est.
Observatorio	26.7	1.3	Pantitlán	13.9	0.4
Tacubaya	27.0	1.1	Zaragoza	15.6	1.0
Juanacatlán	22.2	0.5	Gómez Farías	19.0	1.0
Chapultepec	26.5	0.6	Puerto aéreo	23.6	0.7
Sevilla	27.2	0.5	Balbuena	25.4	0.5
Insurgentes	30.4	0.7	Moctezuma	26.9	0.6
Cuauhtémoc	30.4	0.7	San Lázaro	25.9	0.8
Balderas	28.7	0.8	Candelaria	27.1	0.6
Salto del agua	29.6	0.6	Merced	28.8	0.7
Isabel la católica	31.1	0.4	Pino Suárez	27.8	0.7
Pino Suárez	31.6	1.4	Isabel la católica	28.9	0.6
Merced	29.6	0.4	Salto del agua	30.0	0.6
Candelaria	29.8	0.7	Balderas	27.8	1.0
San Lázaro	31.0	1.9	Cuauhtémoc	26.7	0.5
Moctezuma	28.9	1.1	Insurgentes	30.7	0.6
Balbuena	30.3	0.7	Sevilla	28.2	0.7
Puerto aéreo	26.6	1.0	Chapultepec	28.5	1.0
Gómez Farías	24.3	0.9	Juanacatlán	32.1	0.6
Zaragoza	21.3	1.0	Tacubaya	28.5	0.7
Pantitlán	16.3	0.6	Observatorio	36.8	0.6
En estaciones	27.9	3.0	En estaciones	26.6	4.6
Entre estaciones	27.1	4.2	Entre estaciones	26.9	14.4
Trayecto completo	27.3	4.0	Trayecto completo	26.9	12.9

Tabla XIII. Estadísticos por estación del Metro Línea 1 en la corrida de la tarde.

a) Trayecto de ida

b) Trayecto de regreso

Estación	Prom. PM_{2.5} (ug m⁻³)	Desv. Est.
Observatorio	25.9	1.8
Tacubaya	44.3	2.0
Juanacatlán	31.6	0.8
Chapultepec	26.6	1.2
Sevilla	26.9	2.1
Insurgentes	30.0	1.3
Cuauhtémoc	29.5	1.4
Balderas	26.9	1.2
Salto del agua	23.2	1.1
Isabel la católica	22.2	1.2
Pino Suárez	22.3	1.2
Merced	23.8	1.1
Candelaria	26.2	1.5
San Lázaro	24.8	1.6
Moctezuma	38.9	13.1
Balbuena	32.2	1.8
Puerto aéreo	29.6	1.2
Gómez Farías	51.7	5.7
Zaragoza	26.3	0.8
Pantitlán	24.9	1.4
En estaciones	33.9	12.4
Entre estaciones	29.8	7.3
Trayecto completo	30.9	9.1

Estación	Prom. PM_{2.5} (ug m⁻³)	Desv. Est.
Pantitlán	21.7	1.0
Zaragoza	23.3	0.8
Gómez Farías	29.6	3.4
Puerto aéreo	54.4	2.9
Balbuena	28.2	1.2
Moctezuma	23.7	1.5
San Lázaro	18.7	1.3
Candelaria	16.3	0.9
Merced	17.6	0.6
Pino Suárez	16.6	1.4
Isabel la católica	17.6	1.2
Balderas	17.9	0.9
Cuauhtémoc	18.2	0.8
Insurgentes	21.9	1.2
Sevilla	19.7	0.9
Chapultepec	21.1	1.2
Juanacatlán	30.3	3.8
Tacubaya	19.8	1.0
Observatorio	50.1	1.0
En estaciones	25.0	13.2
Entre estaciones	24.2	10.9
Trayecto completo	24.4	11.4

B. METRO LÍNEA 3

Tabla XIV. Estadísticos por estación del Metro Línea 3 en la corrida de la mañana.

a) Trayecto de ida

b) Trayecto de regreso

Estación	Prom. PM_{2.5} (ug m⁻³)	Desv. Est.	Estación	Prom. PM_{2.5} (ug m⁻³)	Desv. Est.
Universidad	25.9	1.3	Indios verdes	43.1	0.8
Copilco	27.8	1.2	Deportivo 18 de marzo	46.1	0.8
Miguel Ángel de Quevedo	36.1	0.4	Potrero	39.7	0.9
Viveros / Derechos			La Raza	36.6	0.6
Humanos	38.2	0.9	Tlatelolco	32.7	0.5
Coyoacán	28.6	2.7	Guerrero	37.3	3.2
Zapata	26.2	0.7	Hidalgo	36.7	0.9
División del Norte	26.1	0.6	Juárez	33.9	0.8
Eugenia	31.0	1.1	Balderas	34.6	0.6
Etiopía	26.6	0.5	Niños héroes	34.9	0.7
Centro médico	26.3	0.4	Hospital general	33.5	1.1
Hospital general	25.1	0.7	Centro médico	31.4	0.6
Niños héroes	25.9	0.8	Etiopía	29.0	0.8
Balderas	26.5	0.6	Eugenia	29.1	0.4
Juárez	26.7	0.7	División del Norte	29.6	1.0
Hidalgo	29.3	0.8	Zapata	28.2	0.7
Guerrero	28.2	0.8	Coyoacán	29.3	0.4
Tlatelolco	27.3	0.4	Viveros / Derechos		
La Raza	30.2	0.9	Humanos	35.7	1.6
Potrero	38.1	0.8	Miguel Ángel de Quevedo	35.4	0.8
Deportivo 18 de marzo	40.9	0.9	Copilco	31.4	2.2
Indios verdes	45.2	1.6	Universidad	26.2	0.8
En estaciones	28.6	4.0	En estaciones	34.6	5.1
Entre estaciones	31.4	6.1	Entre estaciones	36.6	5.9
Trayecto completo	30.5	5.7	Trayecto completo	36.2	5.8

Tabla XV. Estadísticos por estación del Metro Línea 3 en la corrida del mediodía.

a) Trayecto de ida

b) Trayecto de regreso

Estación	Prom. PM_{2.5} (ug m⁻³)	Desv. Est.
Universidad	30.0	5.2
Copilco	30.9	0.8
Miguel Ángel de Quevedo	33.2	1.8
Viveros / Derechos Humanos	34.1	1.3
Coyoacán	34.8	1.7
Zapata	29.5	1.5
División del Norte	27.6	1.8
Eugenia	33.2	1.3
Etiopía	32.7	1.5
Centro médico	29.4	1.5
Hospital general	27.6	1.2
Niños héroes	26.9	1.2
Balderas	32.0	1.2
Juárez	29.1	1.9
Hidalgo	28.1	2.4
Guerrero	28.7	1.1
Tlatelolco	28.9	1.0
La Raza	36.7	1.3
Potrero	35.5	0.7
Deportivo 18 de marzo	41.7	1.1
Indios verdes	53.1	1.5
En estaciones	30.3	3.9
Entre estaciones	31.9	4.7
Trayecto completo	31.5	4.5

Estación	Prom. PM_{2.5} (ug m⁻³)	Desv. Est.
Indios verdes	41.5	1.8
Deportivo 18 de marzo	43.0	1.5
Potrero	46.8	1.4
La Raza	38.7	2.2
Tlatelolco	37.0	1.5
Guerrero	36.9	2.8
Hidalgo	37.5	1.9
Juárez	35.9	1.8
Balderas	36.8	1.6
Niños héroes	34.9	1.3
Hospital general	32.5	1.7
Centro médico	34.9	2.7
Etiopía	31.0	1.2
Eugenia	34.0	1.7
División del Norte	29.8	1.8
Zapata	29.3	2.3
Coyoacán	29.1	1.5
Viveros / Derechos Humanos	33.8	1.7
Miguel Ángel de Quevedo	29.1	1.5
Copilco	27.1	1.5
Universidad	24.7	3.6
En estaciones	36.2	4.8
Entre estaciones	34.8	5.6
Trayecto completo	35.1	5.4

Tabla XVI. Estadísticos por estación del Metro Línea 3 en la corrida de la tarde.

a) Trayecto de ida

b) Trayecto de regreso

Estación	Prom. PM_{2.5} (ug m⁻³)	Desv. Est.	Estación	Prom. PM_{2.5} (ug m⁻³)	Desv. Est.
Universidad	38.1	0.6	Indios verdes	32.5	0.7
Copilco	36.8	0.7	Deportivo 18 de marzo	32.3	2.6
Miguel Ángel de Quevedo	36.6	0.7	Potrero	25.5	7.1
Viveros / Derechos Humanos	37.6	1.5	La Raza	28.7	1.2
Coyoacán	37.2	0.6	Tlatelolco	27.9	0.5
Zapata	36.5	1.0	Guerrero	27.7	0.6
División del Norte	35.7	0.7	Hidalgo	29.2	0.7
Eugenia	34.6	0.7	Juárez	33.4	1.1
Etiopía	33.4	0.6	Balderas	36.7	1.7
Centro médico	33.2	0.5	Niños héroes	39.2	1.0
Hospital general	32.6	1.3	Hospital general	35.7	0.8
Niños héroes	29.1	0.5	Centro médico	33.6	0.8
Balderas	49.4	10.0	Etiopía	32.4	1.2
Juárez	34.4	2.0	Eugenia	30.3	0.6
Hidalgo	28.6	0.5	División del Norte	29.5	1.2
Guerrero	28.7	1.1	Zapata	33.6	1.6
Tlatelolco	31.2	0.6	Coyoacán	31.5	1.0
La Raza	50.5	8.3	Miguel Ángel de Quevedo	32.6	0.9
Potrero	31.3	0.9	Viveros / Derechos Humanos	36.2	1.4
Deportivo 18 de marzo	28.3	0.9	Copilco	33.9	1.8
Indios verdes	34.5	1.2	Universidad	29.3	0.6
En estaciones	38.5	10.0	En estaciones	32.8	3.0
Entre estaciones	36.8	21.2	Entre estaciones	32.7	5.0
Trayecto completo	37.4	18.4	Trayecto completo	32.7	4.5

C. METROBÚS LÍNEA 1

Tabla XVII. Estadísticos por estación del Metrobús Línea 1 en la corrida de la mañana.

a) Trayecto de ida

Estación	Prom. PM_{2.5} (ug m⁻³)	Desv. Est.
El Caminero	21.6	0.7
Santa Úrsula	37.8	2.4
Fuentes Brotantes	32.5	2.5
Ayuntamiento	29.0	2.7
Corregidora	31.8	1.1
Villa Olímpica	20.4	0.8
Perisur	26.7	0.9
CCU	27.2	1.0
Ciudad Universitaria	26.3	1.1
Doctor Gálvez	40.0	1.1
La Bombilla	34.3	0.7
Altavista	35.0	0.7
Olivo	36.8	0.5
Francia	33.5	0.6
José María Velasco	35.1	0.7
Teatro Insurgentes	34.0	0.4
Río Churubusco	34.4	0.7
Félix Cuevas	33.2	1.3
Parque Hundido	29.7	0.7
Cd. De los Deportes	41.7	5.2
Col. Del Valle	30.9	0.8
Nápoles	29.0	1.2
Poliforum	46.1	3.0
La Piedad	29.6	0.7
Nuevo León	28.8	0.9
Chilpancingo	29.9	1.1
Campeche	34.7	8.1
Sonora	37.7	1.7
Álvaro Obregón	33.7	0.7
Durango	36.9	1.0
Glorieta Insurgentes	30.2	0.9
Hamburgo	35.0	0.7
Reforma	30.9	1.0
Plaza de la República	31.5	0.6
Revolución	33.1	0.8
El Chopo	33.8	1.0
Buenavista	32.6	0.7
Manuel González	46.1	1.8
San Simón	34.5	0.9
Circuito	34.6	0.5
La Raza	38.4	0.5
Potrero	39.9	0.6
Euzkaro	37.3	1.0
Deportivo 18 de marzo	39.3	1.1
Indios verdes	30.6	5.8
En estaciones	33.6	5.4
Entre estaciones	35.5	86.6
Trayecto completo	35.3	81.9

b) Trayecto de regreso

Estación	Prom. PM_{2.5} (ug m⁻³)	Desv. Est.
Indios verdes	49.7	10.2
Deportivo 18 de marzo	38.8	0.8
Euzkaro	36.5	0.5
Potrero	36.1	1.2
La Raza	33.0	0.7
Circuito	34.7	0.7
San Simón	32.3	0.7
Manuel González	41.4	4.1
Buenavista	39.6	2.8
El Chopo	39.9	1.2
Revolución	41.0	0.8
Plaza de la República	42.6	4.3
Reforma	37.7	1.6
Hamburgo	33.1	0.7
Glorieta Insurgentes	39.3	1.7
Durango	53.7	1.4
Álvaro Obregón	40.4	1.0
Sonora	43.7	1.9
Campeche	40.1	0.8
Chilpancingo	42.1	0.5
Nuevo León	40.2	1.8
La Piedad	39.8	1.6
Poliforum	38.2	0.5
Nápoles	41.6	0.8
Col. Del Valle	41.9	0.7
Cd. De los Deportes	66.5	2.1
Parque Hundido	59.3	2.3
Félix Cuevas	43.8	1.5
Río Churubusco	37.6	1.0
Teatro Insurgentes	44.5	1.6
José María Velasco	44.4	1.6
Francia	47.3	1.7
Olivo	39.0	0.9
Altavista	38.1	0.9
La Bombilla	37.2	1.5
Doctor Gálvez	35.6	0.9
Ciudad Universitaria	51.4	1.7
CCU	43.8	1.3
Perisur	42.2	1.9
Corregidora	39.1	1.8
Ayuntamiento	38.8	4.5
Fuentes Brotantes	34.5	1.1
Santa Úrsula	36.6	0.6
La Joya	35.5	0.7
El Caminero	29.9	1.2
En estaciones	41.0	6.9
Entre estaciones	40.9	11.2
Trayecto completo	40.9	10.9

**Tabla XVIII. Estadísticos por estación del Metrobús Línea 1 en la
corrida de la tarde.**

a) Trayecto de ida

Estación	Prom. PM_{2.5} (ug m⁻³)	Desv. Est.
El Caminero	15.6	0.4
La Joya	43.0	2.4
Santa Úrsula	49.0	0.5
Fuentes Brotantes	30.3	1.0
Ayuntamiento	23.3	2.2
Corregidora	25.2	4.1
Villa Olímpica	41.1	3.5
Perisur	29.8	2.0
CCU	39.9	1.2
Ciudad Universitaria	46.2	1.7
Doctor Gálvez	32.4	1.0
La Bombilla	37.3	0.6
Altavista	35.8	0.6
Olivo	32.4	2.0
Francia	36.7	5.3
José María Velasco	28.8	4.0
Teatro Insurgentes	31.9	0.7
Río Churubusco	29.0	1.2
Félix Cuevas	30.0	1.0
Parque Hundido	34.2	1.6
Cd. De los Deportes	22.6	0.7
Col. Del Valle	17.2	0.7
Nápoles	29.0	0.5
Poliforum	45.1	3.7
La Piedad	32.1	1.5
Nuevo León	41.9	1.0
Chilpancingo	41.9	1.2
Campeche	38.2	1.0
Sonora	28.4	0.6
Álvaro Obregón	36.8	1.7
Durango	35.4	1.4
Glorieta Insurgentes	66.7	80.2
Hamburgo	31.4	1.0
Reforma	37.2	1.6
Plaza de la República	28.5	1.8
Revolución	26.0	1.2
El Chopo	32.1	2.2
Buenavista	26.4	1.2
Manuel González	48.3	2.1
San Simón	30.9	1.0
Circuito	26.8	1.3
La Raza	36.9	1.7
Potrero	59.9	1.4
Euzkaro	31.2	1.2
Deportivo 18 de marzo	50.2	1.1
Indios verdes	15.1	0.8
En estaciones	35.0	17.2
Entre estaciones	37.6	18.2
Trayecto completo	37.4	18.2

b) Trayecto de regreso

Estación	Prom. PM_{2.5} (ug m⁻³)	Desv. Est.
Indios verdes	16.5	1.1
Deportivo 18 de Marzo	15.0	0.6
Euzkaro	14.7	0.7
Potrero	17.1	1.1
La Raza	16.3	1.3
Circuito	16.0	2.2
San Simón	16.7	1.3
Manuel González	16.3	0.4
Buenavista	16.0	1.1
El Chopo	16.8	0.8
Revolución	20.6	1.6
Plaza de la República	19.5	2.0
Reforma	17.4	0.7
Hamburgo	21.7	1.6
Glorieta Insurgentes	16.4	0.7
Durango	27.3	1.1
Álvaro Obregón	30.0	1.2
Sonora	23.4	1.0
Campeche	21.5	1.2
Chilpancingo	21.4	4.1
Nuevo León	16.2	1.0
La Piedad	17.8	0.6
Poliforum	16.9	1.5
Col. Del Valle	20.9	1.5
Cd. De los Deportes	19.2	0.6
Parque Hundido	22.2	1.1
Félix Cuevas	17.6	1.1
Río Churubusco	16.1	1.0
Teatro Insurgentes	19.4	1.3
José María Velasco	24.4	1.3
Francia	44.7	1.9
Olivo	20.4	1.3
Altavista	19.8	2.4
La Bombilla	16.2	2.0
Doctor Gálvez	21.9	1.1
Ciudad Universitaria	17.0	1.2
CCU	18.1	1.6
Perisur	23.2	1.7
Villa Olímpica	23.1	0.9
Corregidora	19.2	1.0
Ayuntamiento	23.1	3.3
Fuentes Brotantes	19.0	1.0
Santa Úrsula	16.8	1.1
La Joya	25.1	3.7
El Caminero	14.4	0.7
En estaciones	20.7	4.7
Entre estaciones	18.2	11.1
Trayecto completo	18.6	10.4

D. METROBÚS LÍNEA 2

Tabla XIX. Estadísticos por estación del Metrobús Línea 2 en la corrida de la mañana.

a) Trayecto de ida

Estación	Prom. PM _{2.5} (ug m ⁻³)	Desv. Est.
Tacubaya	92.5	7.7
De la Salle	71.2	1.3
Patriotismo	65.7	1.8
Escandón	64.2	1.8
Nuevo León	65.4	0.6
Viaducto	69.3	1.5
Amores	71.0	1.8
Etiopía	95.7	2.2
Dr. Vértiz	88.3	1.7
Centro SCOP	80.2	1.5
Álamos	75.9	2.3
Xola	69.0	1.3
Las Américas	71.2	0.8
Andrés Molina Enríquez	62.7	1.5
Antonio Maseo	81.4	1.5
La Viga	71.3	1.1
Coyuya	64.9	1.1
Canela	62.5	1.2
Tlacotal	57.8	0.8
Goma	59.7	2.4
Iztacalco	69.0	1.3
UPIICSA	67.7	1.7
El Rodeo	76.9	0.9
Río Tecolutla	73.9	2.2
Río Mayo	70.9	1.6
Rojo Gómez	67.4	1.1
Del Moral	69.5	1.6
Leyes de Reforma	66.6	1.0
CCH Oriente	71.9	0.9
Const. de Apatzingán	67.4	1.3
Canal de San Juan	71.0	1.2
Nicolás Bravo	59.0	0.5
Tepalcates	53.9	3.0
En estaciones	70.2	8.8
Entre estaciones	71.9	9.1
Trayecto completo	71.7	9.1

b) Trayecto de regreso

Estación	Prom. PM _{2.5} (ug m ⁻³)	Desv. Est.
Tepalcates	161.3	81.8
Gral. A. de León	55.8	1.1
Const. de Apatzingán	74.8	3.7
CCH Oriente	69.6	2.7
Leyes de reforma	80.6	1.7
Rio Frío	62.8	1.6
Rojo Gómez	72.5	3.1
Rio Mayo	65.0	3.4
Rio Tecolutla	63.7	1.8
El Rodeo	65.1	1.6
UPIICSA	69.0	1.2
Iztacalco	63.0	2.1
Goma	64.1	1.0
Tlacotal	58.1	1.2
Canela	56.4	1.4
Coyuya	57.7	1.2
La Viga	57.6	0.8
Andres Molina Enríquez	59.6	1.2
Las Américas	59.1	0.4
Xola	62.4	0.8
Álamos	74.8	1.7
Centro SCOP	71.0	0.7
Dr. Vértiz	69.2	1.1
Etiopía	73.1	0.9
Amores	69.5	1.1
Viaducto	64.7	0.7
Nuevo León	63.9	0.7
Escandón	60.1	1.0
Patriotismo	56.4	0.7
De la Salle	56.0	0.8
Parque Lira	51.2	1.0
Tacubaya	51.8	2.9
En estaciones	70.5	31.2
Entre estaciones	64.8	8.1
Trayecto completo	65.5	13.0

Tabla XX. Estadísticos por estación del Metrobús Línea 2 en la corrida de la tarde.

a) Trayecto de ida			b) Trayecto de regreso		
Estación	Prom. PM _{2.5} (ug m ⁻³)	Desv. Est.	Estación	Prom. PM _{2.5} (ug m ⁻³)	Desv. Est.
Tacubaya	34.8	4.3	Tepalcates	33.5	2.2
Antonio Maceo	31.9	1.2	Gral. A. de León	22.2	1.0
De la Salle	24.6	0.9	Const. De		
Patriotismo	26.1	0.8	Apatzingán	28.1	0.9
Escandón	24.4	0.8	CCH Oriente	62.9	8.0
Nuevo León	22.5	1.1	Leyes de Reforma	58.7	3.6
Viaducto	27.7	6.6	Río Frío	36.8	1.8
Amores	21.1	0.9	Rojo Gómez	43.0	2.2
Etiopía	20.5	1.8	Río Mayo	40.1	0.8
Dr. Vértiz	20.6	1.4	Río Tecolutla	38.4	1.2
Centro SCOP	31.1	4.6	El Rodeo	44.4	2.8
Álamos	28.3	2.1	UPIICSA	45.4	1.6
Xola	24.7	3.9	Iztacalco	35.1	1.0
Las Américas	28.2	2.0	Goma	36.5	2.6
Andrés Molina	39.7	5.9	Tlacotal	34.1	1.7
La Viga	24.6	0.6	Canela	27.3	0.9
Coyuya	25.9	2.9	Coyuya	27.0	0.6
Canela	26.6	1.8	La Viga	32.1	0.6
Tlacotal	45.7	13.3	Andrés Molina	29.6	1.2
Goma	22.1	1.8	Las Américas	26.2	0.6
Iztacalco	21.3	0.8	Xola	36.9	0.9
UPIICSA	18.6	0.8	Álamos	35.9	0.8
El Rodeo	22.8	2.0	Centro SCOP	39.6	0.9
Río Tecolutla	24.0	2.7	Dr. Vértiz	37.7	1.1
Río Mayo	23.2	2.4	Etiopía	44.8	1.9
Rojo Gómez	21.2	2.9	Amores	32.2	1.1
Del Moral	25.5	6.6	Viaducto	35.0	2.6
Leyes de Reforma	20.6	0.9	Nuevo León	35.9	1.9
CCH Oriente	21.6	1.1	Escandón	31.3	1.1
Const. De Apatzingán	19.9	2.2	Patriotismo	33.6	1.4
Canal de San Juan	24.0	0.6	De la Salle	39.5	0.7
Nicolás Bravo	23.0	0.8	Parque Lira	34.2	1.2
Tepalcates	17.1	0.6	Tacubaya	59.6	0.6
En estaciones	24.6	6.4	En estaciones	37.3	8.6
Entre estaciones	25.8	23.2	Entre estaciones	35.9	9.5
Trayecto completo	25.7	22.0	Trayecto completo	36.0	9.4

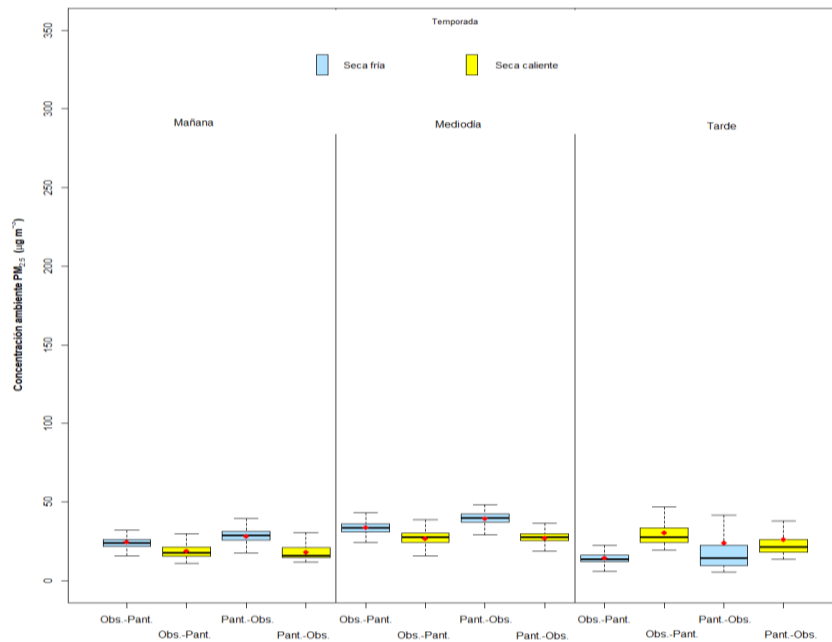
ANEXO IX. Tabla resumen de promedios globales obtenidos en Metro y Metrobús

Temporada	Horario	Recorrido	Transporte de Norte a Sur de la ZMVM				Transporte de Este a Oeste de la ZMVM			
			Metro Línea 3		Metrobús Línea 1		Metro Línea 1		Metrobús Línea 2	
			Conc. Menor de PM _{2.5} (µg m ⁻³)	Conc. Mayor de PM _{2.5} (µg m ⁻³)	Conc. Menor de PM _{2.5} (µg m ⁻³)	Conc. Mayor de PM _{2.5} (µg m ⁻³)	Conc. Menor de PM _{2.5} (µg m ⁻³)	Conc. Mayor de PM _{2.5} (µg m ⁻³)	Conc. Menor de PM _{2.5} (µg m ⁻³)	Conc. Mayor de PM _{2.5} (µg m ⁻³)
Seca fría	A)Mañana	Completo	14.9	19.2	58	143.4	24.5	28.1	30.2	38
		En estaciones	14.2	21.8	55.7	144.5	25.7	28	28.7	38.1
		Entre estaciones	15.1	18.6	58.2	143.2	23.4	28.1	30.3	38
	B)Mediodía	Completo	12.3	17.6	NA	NA	33.3	39.1	NA	NA
		En estaciones	11.7	18.6	NA	NA	33.8	39.8	NA	NA
		Entre estaciones	12.4	17.2	NA	NA	33.1	38.9	NA	NA
	C)Tarde	Completo	8.4	12.5	15.7	17.8	14.2	24.1	18.9	20.7
		En estaciones	8.5	12.8	15.1	18.6	13.8	25.3	16.5	23.3
		Entre estaciones	8.3	12.4	15.7	17.7	14.3	23.7	17	20.5
Seca caliente	A)Mañana	Completo	30.5	36.2	35.3	40.9	17.5	18.5	65.5	71.7
		En estaciones	28.6	34.6	33.6	41	16	19.8	70.2	70.5
		Entre estaciones	31.4	36.6	35.5	40.9	17.9	19.1	64.8	71.9
	B)Mediodía	Completo	31.5	35.1	NA	NA	26.9	27.3	NA	NA
		En estaciones	30.3	36.2	NA	NA	26.6	27.9	NA	NA
		Entre estaciones	31.9	34.8	NA	NA	26.9	27.1	NA	NA
	C)Tarde	Completo	32.7	37.4	18.6	37.4	24.4	30.9	25.7	36
		En estaciones	32.8	38.5	20.7	35	25	33.9	24.6	37.3
		Entre estaciones	32.7	36.8	18.2	37.6	24.2	29.8	25.8	35.9

ANEXO X. Comparación de transportes de Metro y Metrobús con gráficas de cajas

TRANSPORTE DE ESTE A OESTE DE LA ZMVM

A) Metro Línea 1



B) Metrobús Línea 2

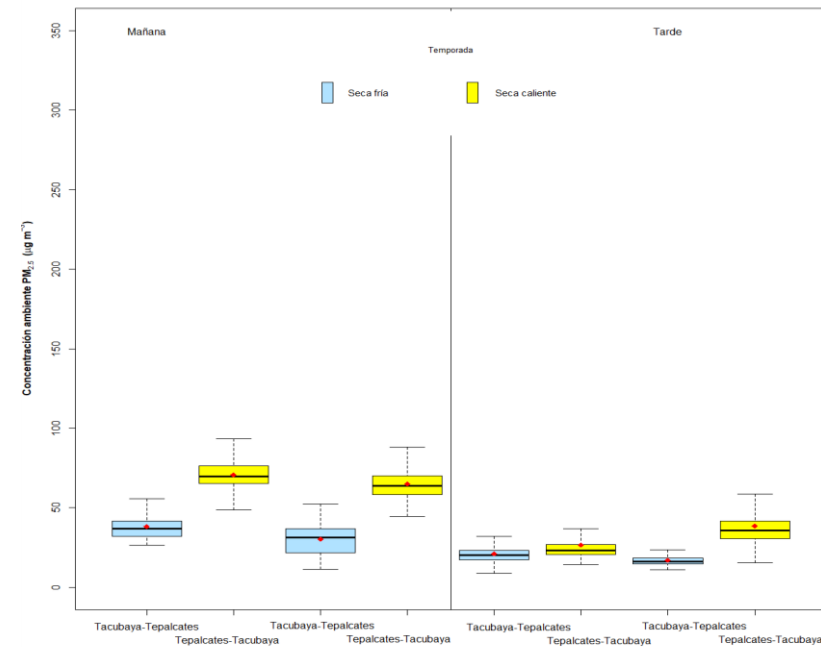
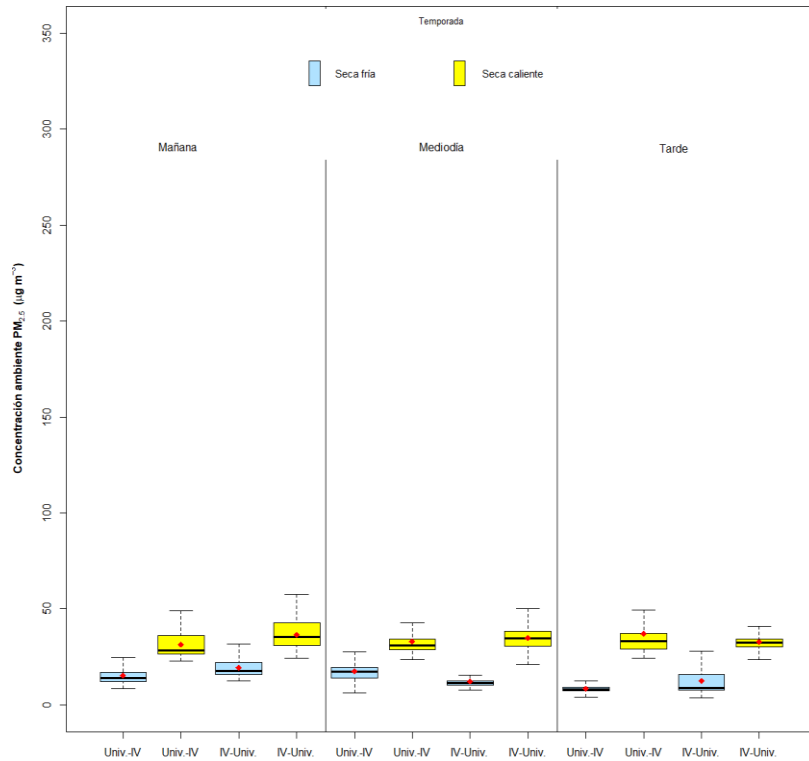


Figura 40. Gráfica de caja y bigotes de las concentraciones ambiente de $PM_{2.5}$ observadas en A) línea 1 del Metro y B) Línea 2 del Metrobús en las temporadas seca fría de 2017 y seca caliente de 2018. La línea horizontal (—) muestra la mediana y la marca roja (♦) el promedio aritmético, los extremos de la caja el percentil 25 y 75, y los bigotes los percentiles 5 y 95.

TRANSPORTE DE NORTE A SUR DE LA ZMVM

A) Metro Línea 3



B) Metrobús Línea 1

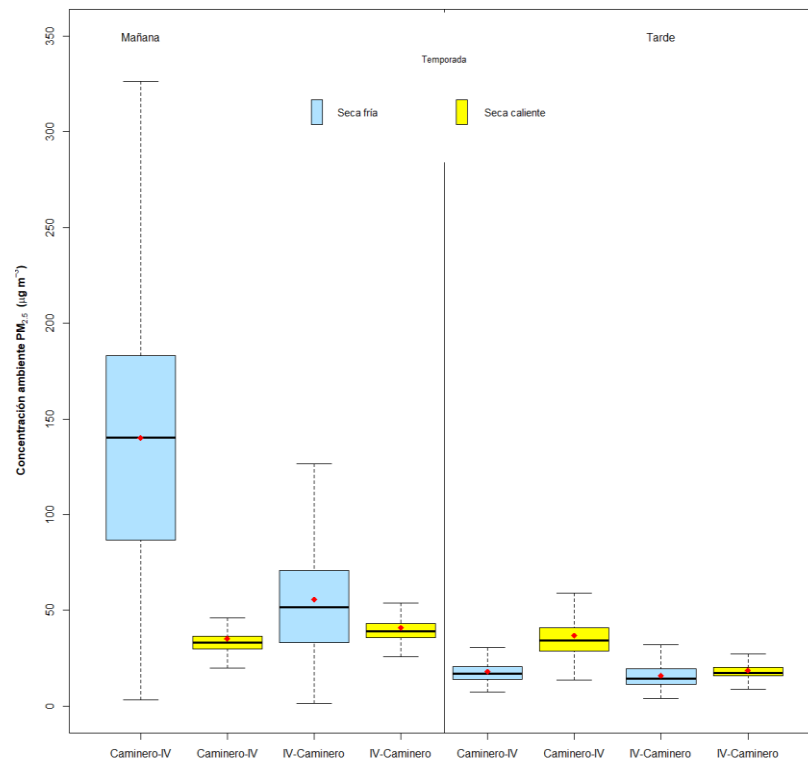


Figura 41. Gráfica de caja y bigotes de las concentraciones ambiente de $PM_{2.5}$ observadas en A) Línea 3 del Metro y B) Línea 2 del Metrobús en las temporadas seca fría de 2017 y seca caliente de 2018. La línea horizontal (—) muestra la mediana y la marca roja (♦) el promedio aritmético, los extremos de la caja el percentil 25 y 75, y los bigotes los percentiles 5 y 95.

ANEXO XI. Bitácora de registro de autobuses empleados en campañas de muestreo en MB

Temporada	Línea	Horario	Operador	Marca y modelo	Especificaciones
Seca Fría	1	Mañana Ida	CISA 108	Volvo-San Marino B12M	Motor diésel con tecnología Euro3
		Mañana Regreso	CISA 029	Volvo-San Marino B12M	Motor diésel con tecnología Euro3
		Tarde Ida	CISA 1034B	Volvo 7300 BRT Biarticulado	Motor diésel con tecnología Euro5
		Tarde Regreso	CISA 001	Volvo-San Marino B12M	Motor diésel con tecnología Euro3
	2	Mañana Ida	CE4-17MSA-325	Dina Brighter BRT	Motor diésel con tecnología Euro5
		Mañana Regreso	CTT-351	Volvo 7300 BRT Articulado	Motor diésel con tecnología Euro5
		Tarde Ida	CE4-17M 301	Volvo 7300 BRT Articulado	Motor diésel con tecnología Euro5
		Tarde Regreso	CTT-373	Volvo 7300 BRT Articulado	Motor diésel con tecnología Euro5
Seca Caliente	1	Mañana Ida	VYC1063-B	Volvo 7300 BRT Biarticulado	Motor diésel con tecnología Euro5
		Mañana Regreso	CISA-1034-B	Volvo 7300 BRT Biarticulado	Motor diésel con tecnología Euro5
		Tarde Ida	CISA-1031-B	Volvo 7300 BRT Biarticulado	Motor diésel con tecnología Euro5
		Tarde Regreso	RECSA-1094-B	Volvo 7300 BRT Biarticulado	Motor diésel con tecnología Euro5
	2	Mañana Ida	CE4-17MSA-335	Dina Brighter BRT	Motor diésel con tecnología Euro5
		Mañana Regreso	PROT-14	Mercedes Benz Gran Viaje	Motor diésel con tecnología Euro 5
		Tarde Ida	CE4-17MSA-314	Volvo 7300 BRT Articulado	Motor diésel con tecnología Euro5
		Tarde Regreso	CTT-2354	Volvo 7300 BRT Articulado	Motor diésel con tecnología Euro5

ANEXO XII. Estimación de la exposición promedio para una jornada laboral

Temporada	Horario	Recorrido	Transporte de Norte a Sur de la ZMVM		Transporte de Este a Oeste de la ZMVM	
			Metro Línea 3	Metrobús Línea 1	Metro Línea 1	Metrobús Línea 2
			Prom. 8h ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Prom. 8h ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Prom. 8h ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Prom. 8h ($\mu\text{g m}^{-3}$)
Seca fría	Mañana	Completo	84.4	267.0	118.0	126.9
	Mediodía	Completo	78.0	NA	182.9	NA
	Tarde	Completo	49.7	45.2	110.7	67.3
	3 horarios	Completo	23.4	NA	45.8	NA
	Mañana y tarde	Completo	NA	78.5	NA	48.3
Seca caliente	Mañana	Completo	141.7	38.1	82.3	68.6
	Mediodía	Completo	179.6	NA	153.0	NA
	Tarde	Completo	150.2	28	144.3	30.9
	3 horarios	Completo	51.8	NA	41.3	NA
	Mañana y tarde	Completo	NA	33.1	NA	49.7