



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

## FACULTAD DE QUÍMICA

EVALUACIÓN DE LA EXPOSICIÓN PERSONAL A  $PM_{2.5}$  EN  
EL METROBÚS DE LA CIUDAD DE MÉXICO

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERIA QUÍMICA

**PRESENTA**

RAYMUNDO IVÁN GONZÁLEZ BUENDÍA

**DIRECTOR DE TESIS**

DR. IVÁN YASSMANY HERNÁNDEZ PANIAGUA



CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX, 2020.



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: Luz María Lazcano Arriola

**VOCAL:** Profesor: José Agustín García Reynoso

**SECRETARIO:** Profesor: Iván Yassmany Hernández Paniagua

**1<sup>er</sup>. SUPLENTE:** Profesor: Yamileth Yazmín Martínez Vega

**2<sup>do</sup>. SUPLENTE:** Profesor: David fragoso Osorio

**SITIO DONDE SE DESARROLLO EL TEMA:**

Centro de Ciencias de la Atmósfera, Ciudad Universitaria, CDMX.

**ASESOR DEL TEMA**

---

Dr. Iván Yassmany Hernández Paniagua

**SUSTENTANTE**

---

Raymundo Iván González Buendía

---

## ÍNDICE

---

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>5</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>7</b>
2.1. Objetivo General .....	7
2.2. Objetivos Particulares.....	7
<b>3. MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES .....</b>	<b>8</b>
3.1. Contaminación atmosférica.....	8
3.2. Partículas en suspensión (PS).....	12
3.3. Las PM <sub>2.5</sub> .....	13
3.4. Efectos en la salud.....	14
3.5. Regulación y normatividad aplicable a los niveles de PM <sub>2.5</sub> .....	16
3.6. Antecedentes de exposición personal a PM <sub>2.5</sub> .....	20
3.7. La exposición personal en la ZMVM.....	22
<b>4. METODOLOGÍA.....</b>	<b>24</b>
4.1 Diseño experimental de campañas de monitoreo.....	24
4.2 Instrumentos de medición.....	27
4.3 Sitios de medición .....	30
4.3.1 Metrobús de la Ciudad de México.....	32
<b>5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....</b>	<b>38</b>
5.1 Factores de corrección para pDR. ....	38
5.1.1 Factor de corrección para pDR 2. ....	38
5.1.2 Factor de corrección para pDR 3. ....	40
5.2 Series de tiempo de las campañas de muestreo.....	42
5.2.1 Series de tiempo de la línea 1 del Metrobús.....	42
5.2.2 Series de tiempo de la línea 2 del Metrobús.....	46
5.2.3 Series de tiempo de la línea 7 del Metrobús.....	49
5.3 Análisis estadísticos de las series de tiempo. ....	51
5.3.1 Análisis estadístico de la línea 1 del Metrobús. ....	52
5.3.2 Análisis estadístico de la línea 7 del Metrobús. ....	55
5.3.3 Análisis estadístico de la línea 2 del Metrobús. ....	58
5.3.4 Análisis estadístico de las líneas 1,2 y 7 del Metrobús en el horario de la mañana.....	60
5.3.5 Análisis estadístico de las líneas 1, 2 y 7 del Metrobús en el horario de la tarde. ....	62

5.3.6 Análisis estadístico de las líneas 1,2 y 7 del Metrobús en la temporada seca fría y seca caliente. ....	64
5.4 Exposición a concentraciones ambiente de PM <sub>2.5</sub> por tiempo realizado y por kilómetro recorrido.....	67
<b>6. CONCLUSIONES .....</b>	<b>73</b>
<b>7. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>76</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>77</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>81</b>
ANEXO I. Calibración del pDR. ....	81
1. Calibración “cero” del pDR-1500.....	81
2. Calibración del flujo en el pDR-1500. ....	82
ANEXO II. Validación gravimétrica y factores de corrección. ....	86
1. Metodología de estabilización de filtros.....	86
2. Características y especificaciones de los filtros.....	86
3. Cálculo de la masa de PM <sub>2.5</sub> .....	87
ANEXO III. Estadísticos de las campañas de muestreo.....	89

---

## 1. INTRODUCCIÓN

---

La contaminación del aire por la presencia de sustancias ajenas a este tiene un efecto negativo en la salud humana y al ambiente (OMS, 2018). Diversos estudios realizados en ciudades alrededor del mundo han demostrado que existe una relación entre el incremento en la concentración de los contaminantes del aire y el aumento de enfermedades respiratorias y cardiovasculares (Falcon-Rodríguez, 2016).

Las concentraciones de las diferentes fracciones de partículas suspendidas menores medidas por la red de monitoreo de la Ciudad de México superan de forma recurrente las concentraciones límite establecidas en la norma NOM-025-SSA1-2004 (SEMARNAT, 2019). Después del ozono, las partículas suspendidas son el contaminante responsable del mayor número de días con una mala condición de calidad del aire en la ZMVM.

Los efectos más importantes en cuanto al deterioro de la calidad del aire están relacionados al crecimiento poblacional y al parque vehicular, lo cual es claro en zonas urbanas. Los vehículos automotores son fuentes significativas de  $PM_{2.5}$  y en la ZMVM sus emisiones representan entre 25 y 30 % del total de emisiones anuales (SEDEMA, 2017). En particular, la población se ve expuesta a concentraciones significativas de  $PM_{2.5}$  en el ambiente cuando realizan actividades de transporte cotidiano, lo cual está relacionado con la proximidad a las fuentes de emisión de dichos contaminantes en los arroyos vehiculares.

Por lo anterior, es importante realizar estudios de exposición personal para cuantificar el riesgo en la salud de individuos urbanos, viajeros o habitantes y en particular, recolectar y analizar información durante largos periodos de tiempo que permitan estimar las variaciones en la misma.

En el presente trabajo se ampliará la información existente y se realizará un análisis estadístico de la exposición a  $PM_{2.5}$  en el sistema de transporte Metrobús, específicamente en la línea 1, línea 2 y la línea 7 de dicho transporte, utilizando las bases de datos de exposición a  $PM_{2.5}$  recolectadas durante el periodo de 2017 a 2019. Además, se discuten los niveles de exposición a  $PM_{2.5}$  según el autobús utilizado, su tecnología y las condiciones externas de los recorridos.

Con lo anterior, se pretende identificar zonas de alta exposición, así como los horarios con los mayores niveles de exposición a  $PM_{2.5}$ . Dicha información es necesaria y puede ser usada potencialmente para diseñar medidas y estrategias de mitigación y reducción de los niveles de exposición a este tipo de contaminante en usuarios que utilicen este transporte, lo cual puede repercutir de forma positiva en la salud de la población.

---

## 2. OBJETIVOS

---

### 2.1. Objetivo General

Determinar la exposición personal a  $PM_{2.5}$  mediante un análisis estadístico de series de tiempo de las concentraciones ambiente de  $PM_{2.5}$  en el Metrobús de la Ciudad de México en los horarios pico de tráfico vehicular.

### 2.2. Objetivos Particulares

- Generar información de campo para determinar los niveles de exposición personal a  $PM_{2.5}$  en las líneas 1,2 y 7 del Metrobús de la Ciudad de México.
- Medir los niveles de concentración ambiente de  $PM_{2.5}$  de los recorridos propuestos en Metrobús en horarios pico de tráfico vehicular.
- Determinar la concentración ambiente de  $PM_{2.5}$  en las líneas de transporte seleccionadas en las temporadas seca caliente y seca fría de la ZMVM.
- Cuantificar, comparar y analizar estadísticamente los niveles de concentración de  $PM_{2.5}$  obtenidos en las mediciones de las rutas a evaluar.



---

## 3. MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES

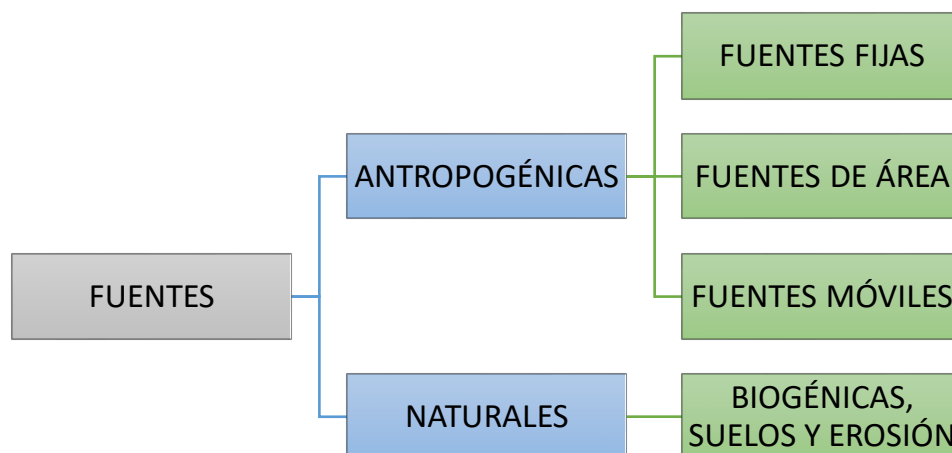
---

### 3.1. Contaminación atmosférica.

La contaminación del aire es la condición atmosférica en la que ciertas sustancias alcanzan concentraciones lo suficientemente elevadas sobre su nivel ambiental normal y tienen un efecto negativo en la salud humana y el ambiente (OMS, 2018). La Organización Mundial de la Salud (OMS) estimó que una de cada nueve muertes en todo el mundo es el resultado de condiciones relacionadas con la contaminación atmosférica (OMS, 2018) y que cada año fallecen unos 7 millones de personas por enfermedades relacionadas con dicho problema (OMS, 2019).

Para que exista contaminación atmosférica es necesario que se produzca la emisión de sustancias a la atmósfera. Estas emisiones pueden ser producidas de forma natural como son las erupciones volcánicas y los incendios naturales, o de forma antropogénica, es decir, producidas por actividades humanas, siendo esta la principal responsable de la generación de contaminación atmosférica (SEMARNAT, 2019).

De manera general, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT, 2019) clasifica las fuentes de emisiones de contaminantes en (Fig.1):



**Figura 1.** Clasificación de las Fuentes de emisión de contaminantes (SEMARNAT, 2019).

## **a) Fuentes Antropogénicas**

Son consecuencia de la presencia y actividades del ser humano. La mayor parte de la contaminación procede de la utilización de combustibles fósiles (carbones, petróleo y gas).

### **i. Fuentes Fijas**

Son las instalaciones de ubicación fija, que tienen como finalidad desarrollar operaciones o procesos industriales de manufactura las cuales pueden generar emisiones contaminantes a la atmósfera.

### **ii. Fuentes de Área**

Las fuentes de área representan aquellas fuentes pequeñas, numerosas y dispersas, y que colectivamente representan un porcentaje significativo de las emisiones de contaminantes. En las fuentes de área se incluyen los comercios, servicios, casas habitación, entre otros.

### **iii. Fuentes Móviles (carreteras y no carreteras)**

Se trata de los vehículos con motores de combustión y similares, que debido a su funcionamiento generan o pueden generar emisiones contaminantes a la atmósfera. Las fuentes móviles carreteras incluyen: tractocamiones, autobuses, camiones, automóviles, motocicletas; mientras que las fuentes móviles que no circulan en carretera comprenden: aviones, helicópteros, ferrocarriles, tranvías, equipo, embarcaciones y maquinarias.

## **b) Fuentes Naturales**

Se trata de cualquier fuente o proceso natural en la vegetación y los suelos que generen emisiones, suelen incluirse las emisiones biogénicas, las emisiones del suelo y la erosión eólica.

### **i. Emisiones biogénicas**

Se trata de los contaminantes que la vegetación (pastos, cultivos, arbustos, bosques, etc.), emite a la atmósfera; la mayor parte son hidrocarburos, específicamente compuestos orgánicos volátiles (COV).

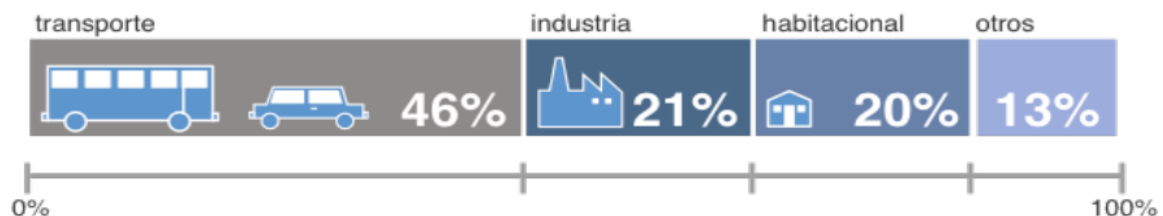
### **ii. Emisiones de suelos**

El óxido nitroso ( $N_2O$ ) es producido naturalmente en los suelos como parte de los procesos de desnitrificación (es decir, la reducción de nitritos y nitratos a nitrógeno gaseoso como  $N_2$  o  $N_xO$ ). Por su parte, los fertilizantes nitrogenados comerciales constituyen una fuente adicional de nitrógeno, lo cual incrementa las emisiones de óxido nitroso del suelo.

### **iii. Erosión eólica**

Es otro fenómeno natural que genera emisiones. Sin embargo, debido a que dichas emisiones típicamente están asociadas con suelos perturbados, frecuentemente son tratadas como fuentes de área.

La contaminación atmosférica en la ZMVM es provocada por diversos factores, entre ellos emisiones locales, las condiciones fisiográficas de la zona y la actividad meteorológica. En particular, los contaminantes provenientes de la combustión por vehículos automotores, en los hogares e instalaciones industriales son las principales fuentes (Fig. 2).



**Figura 2.** Principales fuentes de emisión de contaminantes en la ZMVM (Universidad Autónoma Metropolitana, 2016).

Los contaminantes que se generan por el desarrollo de dichas actividades son muy variados, pero son pocas sustancias las que causan mayor preocupación en referencia al medio ambiente y a la salud humana (OMS, 2018). Estas sustancias nocivas, denominadas contaminantes criterio, se encuentran legislados en la normativa vigente estableciendo unos valores de concentración máximos de estos contaminantes en la atmósfera que no deben ser superados (SEMARNAT, 2019). Entre los contaminantes atmosféricos más relevantes para la salud se encuentran:

### **Partículas en suspensión (PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>)**

Son sustancias sólidas que se encuentran suspendidas en el aire formadas por polvo, polen, humo y hollín, y tienen una contribución significativa del tráfico vehicular, ya que se generan por la quema de combustibles fósiles. Se clasifican por su tamaño en PM<sub>10</sub> con un diámetro menor o igual a 10 µm (las partículas más grandes) y PM<sub>2.5</sub> con un diámetro menor o igual a 2.5 µm (partículas finas).

### **Dióxidos de azufre (SO<sub>x</sub>)**

Son gases incoloros no inflamables formados por partículas de azufre y de oxígeno. Se producen principalmente por la combustión de procesos industriales, tráfico de vehículos y calderas de calefacción. Si se combina con el agua presente en la atmósfera hace que se genere la llamada lluvia ácida, causante de daños en infraestructuras y construcciones.

### **Óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>)**

Son compuestos formados por nitrógeno y oxígeno. Se producen en la combustión de productos fósiles, destacando los vehículos, carbón y quemados de madera. La producción de fertilizantes y explosivos, tabaco y calderas generan emisiones importantes de NO<sub>x</sub>. El monóxido de nitrógeno (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) requieren especial atención. El NO se oxida formando NO<sub>2</sub>, mientras que el NO<sub>2</sub> es precursor del smog fotoquímico.

### **Monóxido de Carbono (CO)**

Es el contaminante que se encuentra en mayor concentración en la atmósfera. Es un gas inflamable, insípido e incoloro. Se produce principalmente por la combustión incompleta de combustibles por automotores, aunque la mayor parte de este gas se encuentra de forma natural en la atmósfera.

### **Ozono troposférico (O<sub>3</sub>)**

Se sitúa junto a la superficie terrestre, en la troposfera. Es un gas tóxico a concentraciones elevadas. Este tipo de ozono se forma por la presencia de luz solar y precursores de ozono como los óxidos de nitrógeno y otros compuestos orgánicos volátiles, emitidos de forma natural en los volcanes, los incendios, o las tormentas, pero también derivados del tráfico o los procesos industriales.

### **Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs)**

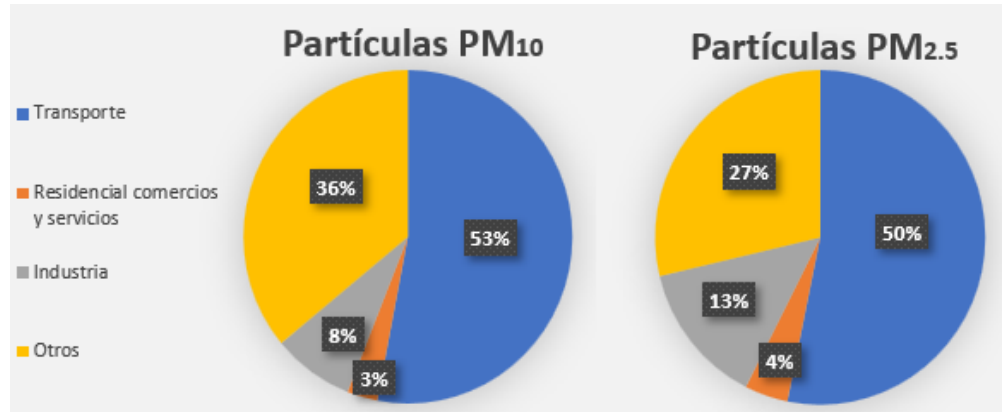
Son compuestos formados por carbono y algunas de las siguientes moléculas: hidrógeno, halógenos, oxígeno, azufre, fósforo, silicio o nitrógeno. Estos compuestos son producidos de forma natural y también mediante actividades como el transporte. Contribuyen a la formación de ozono y smog fotoquímico.

### **3.2. Partículas en suspensión (PS)**

Las PS es cualquier tipo de material sólido o líquido que se encuentra en suspensión en el aire ambiente por periodos variables de tiempo (SEDEMA, 2019). La composición química de PS, en términos generales se divide en fracción orgánica e inorgánica. La fracción orgánica contiene cientos o miles de compuestos dentro de los que se encuentran el carbono elemental, carbón orgánico y material biológico que incluye endotoxinas, bacterias, esporas, alérgenos y polen. La fracción inorgánica se compone principalmente de sulfatos, amonio, nitratos, metales de transición y metales térreos (Mancilla et al., 2014).

Las PS pueden clasificarse en términos de su diámetro aerodinámico que corresponde al diámetro de una esfera uniforme en unidad de densidad que alcanza la misma velocidad terminal de asentamiento que la partícula de interés y que está determinado por la forma y densidad de la partícula (García, 2000). De acuerdo con esto, las PS pueden ser clasificadas de acuerdo con su tamaño en dos grupos principales; partículas PM<sub>10</sub> y la fracción respirable más pequeña, PM<sub>2.5</sub>. La Figura 3 muestra los principales generadores de emisiones de PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub>. Estas partículas también pueden clasificarse de acuerdo con su origen en; partículas primarias y secundarias. Las primeras, son aquellas producidas directamente por

alguna fuente contaminante, y las secundarias, son las que se forman en la atmósfera, como resultado de la interacción química entre sustancias tales como  $\text{SO}_x$  y  $\text{NO}_x$ , entre otras (Heal, Kumar, & Harrison, 2012).

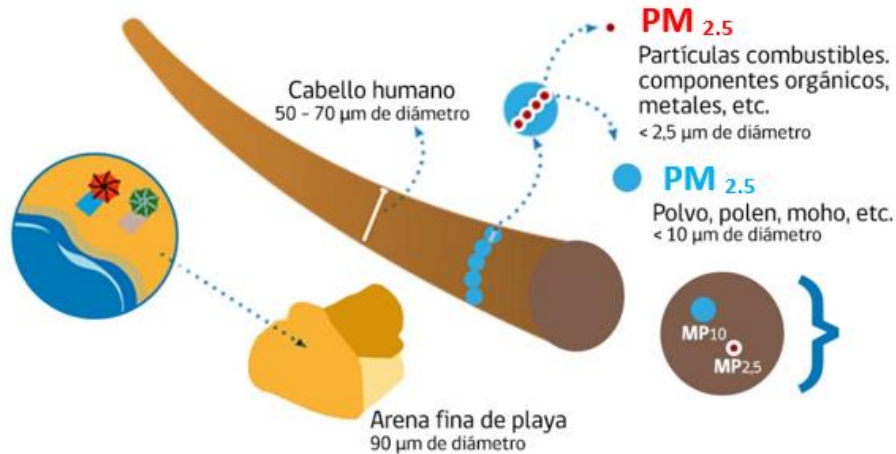


**Figura 3.** Principales generadores de emisiones en la CDMX – Partículas (SEDEMA, 2019).

### 3.3. Las PM<sub>2.5</sub>

Las PM<sub>2.5</sub> están constituidas por partículas de diámetro aerodinámico inferior o igual a los 2.5  $\mu\text{m}$ , es decir, son 100 veces más delgadas que un cabello humano (Fig. 4) (Linares & Diaz, 2008). Debido a su tamaño y peso, si las condiciones meteorológicas son propicias, las PM<sub>2.5</sub> consiguen mantenerse suspendidas en el aire durante más tiempo. Asimismo, su tamaño facilita su transporte por el viento a grandes distancias (Linares & Diaz, 2010).

Una vez liberadas al ambiente, las PM<sub>2.5</sub> pueden ser transportadas desde cientos a miles de kilómetros de la fuente de emisión y permanecer en la atmósfera durante días a semanas, hasta que sean removidas por deposición seca o húmeda. La deposición seca se produce cuando las partículas transportadas por el viento inciden sobre una superficie y se depositan sobre ella.



**Figura 4.** Comparación del tamaño de un cabello y de la arena fina de playa con partículas  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  (Ministerio del medio ambiente, 2018).

En promedio, entre 25-30 % de las  $PM_{2.5}$  proviene de las emisiones de los vehículos Diesel en la ciudad, estando fundamentalmente formadas por partículas secundarias: nitratos y sulfatos (originados por oxidación de  $NO_x$  y  $SO_x$ ), aerosoles orgánicos secundarios, como el peroxiacetil nitrato (PAN) y los hidrocarburos policíclicos aromáticos (HPA) (Linares & Díaz, 2010).

Por lo anterior, las  $PM_{2.5}$  son un buen indicador de la contaminación urbana, debido a que su composición es más tóxica, por un lado, su principal origen es antropogénico y, por otro lado, los efectos que tienen sobre nuestra salud son graves por su gran capacidad de penetración en las vías respiratorias (Linares & Díaz, 2010).

### 3.4. Efectos en la salud

Las  $PM_{2.5}$  tiene, efectos negativos sobre la salud humana, debido a que pueden entrar con facilidad en las vías respiratorias y alterar la actividad alveolar (OMS, 2018). Los efectos que las  $PM_{2.5}$  causan en la salud de las personas han estado históricamente asociados a la exacerbación de enfermedades de tipo respiratorio, tales como asma, enfermedad pulmonar obstructiva crónica, fibrosis pulmonar, cáncer, daño a biomoléculas y tapado de arterias (Falcon-Rodríguez, 2016).

El tamaño de las  $PM_{2.5}$  hace que sean 100% respirables ya que viajan profundamente en los pulmones, penetrando en el aparato respiratorio y depositándose en los alvéolos pulmonares, incluso pueden llegar al torrente sanguíneo (OMS, 2018). Además, estas partículas de menor tamaño están compuestas por elementos que son más tóxicos (como metales pesados y compuestos orgánicos) que los que componen, en general, las partículas más grandes (Linares & Diaz, 2008).

Recientemente también se han analizado y demostrado los efectos de las  $PM_{2.5}$  sobre dolencias de tipo cardiovascular (Linares & Diaz, 2008). De hecho, las  $PM_{2.5}$  ocupan el noveno lugar en la lista de los factores de riesgo asociados con los índices de mortalidad a nivel mundial, principalmente por enfermedades cardiovasculares (López & Pérez, 2014). Así mismo, se ha identificado que los compuestos orgánicos presentes en las partículas tienen posibles efectos mutagénicos y carcinogénicos (Mancilla et al., 2014).

Se ha reportado que las concentraciones de partículas  $PM_{2.5}$  en un intervalo de 11 a  $29.6 \mu\text{g m}^{-3}$ , están relacionadas con morbilidad y mortalidad en ambientes urbanos (Martínez & Ugalde, 2012), y un aumento de  $10 \mu\text{g m}^{-3}$  de partículas  $PM_{2.5}$  incrementa la tasa de mortalidad general (de la población expuesta) en 1% (Cárdenas, 2019). Así, entre los grupos más sensibles a niveles elevados de  $PM_{2.5}$  están niños, ancianos y personas con padecimientos respiratorios y cardiacos (Linares & Diaz, 2010).

Por otra parte, en cuanto a los efectos al ambiente, se sabe que cuando las partículas se depositan en la superficie terrestre, pueden provocar una serie de daños debido a todos los compuestos asociados a las PS. Por ejemplo, se ha observado una reducción en la fotosíntesis, cambios en la salinidad del suelo, disminución de los procesos reproductivos, reducción de la presencia de microorganismos, entre otros (Blanco et al., 2015).



### 3.5. Regulación y normatividad aplicable a los niveles de PM<sub>2.5</sub>

La OMS establece que la exposición a los contaminantes atmosféricos está en gran medida fuera del control personal y requiere medidas de las autoridades públicas a nivel local, nacional e internacional. Derivado de esto, las autoridades nacionales elaboran las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) por conducto de la Secretaría de Salud, las cuales fijan los valores máximos permisibles para aquellos contaminantes que representan un riesgo comprobado en la salud humana (SEMARNAT, 2013).

La Tabla 1 presenta las NOM's de salud ambiental vigentes en México para contaminantes criterio. Para cada NOM, se especifican los valores límite y el estadístico para su evaluación. Para el caso de las PS y plomo, la evaluación se realiza comparando el estadístico de la NOM contra el valor límite, mientras que para el resto de los contaminantes se describe en términos de un valor máximo que no debe superarse durante el año.

**Tabla 1.** Normas Oficiales Mexicanas de Salud Ambiental (SEMARNAT, 2019).

Contaminante	NOM	Publicación	Descripción
Dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> )	NOM-022- SSA1- 2010	8 de septiembre de 2010	0.110 ppm, máximo promedio de 24 horas
			0.200 ppm, segundo máximo anual como promedio móvil de 8 horas 0.025 ppm, promedio anual
Monóxido de carbono (CO)	NOM-021- SSA1- 1993	23 de diciembre de 1994	11.0 ppm, máximo anual como promedio móvil de 8 horas
Dióxido de nitrógeno (NO <sub>2</sub> )	NOM-023- SSA1- 1993	23 de diciembre de 1994	0.210 ppm, promedio horario
Ozono (O <sub>3</sub> )	NOM-020- SSA1- 2014	19 de agosto de 2014	0.095 ppm, promedio horario 0.070 ppm, máximo anual del promedio móvil de 8 horas
Partículas menores a 10 micrómetros (PM <sub>10</sub> )	NOM-025- SSA1- 2014	20 de agosto de 2014	75 µg m <sup>-3</sup> , promedio 24 horas 40 µg m <sup>-3</sup> , promedio anual
Partículas menores a 2.5 micrómetros (PM <sub>2.5</sub> )	NOM-025- SSA1- 2014	20 de agosto de 2014	45 µg m <sup>-3</sup> , promedio 24 horas 12 µg m <sup>-3</sup> , promedio anual
Plomo (Pb)	NOM-026- SSA1- 1993	23 de diciembre de 1994	1.5 µg m <sup>-3</sup> , en un periodo de tres meses como promedio aritmético

En la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), las PM<sub>2.5</sub> son las responsables del mayor número de días con una calidad del aire desfavorable. El reporte Anual de Calidad del Aire 2017 indica que las concentraciones de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> continúan superando los valores recomendados para la protección de la salud pública. En la ZMVM en el año de 2017, las concentraciones máximas para los promedios de 24 horas y anual fueron de 87 µg m<sup>-3</sup> y 30 µg m<sup>-3</sup>, respectivamente, superando los límites de la NOM-025-SSA1-2014, los valores guía de la OMS y el estándar de la US EPA (SEDEMA, 2018).

La Tabla 2 muestra que las concentraciones de las partículas PM<sub>2.5</sub> evaluadas por el Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT), continúan superando las concentraciones límite establecidas en la NOM-025-SSA1-2004 (SEDEMA, 2019). Ahora bien, si se cumpliera la norma mexicana de 45 µg m<sup>-3</sup> como la máxima concentración en un día, entonces se evitarían alrededor de 400 muertes en un corto plazo. Y si se cumpliera la norma recomendada por la OMS, se evitarían alrededor de 2,300 muertes más (SEMARNAT, 2019).

**Tabla 2.** Comparación de las concentraciones ambiente de PM<sub>2.5</sub> establecidas en la NOM-025-SSA1-2014, en 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
	45 µg m <sup>-3</sup>	12 µg m <sup>-3</sup>	25 µg m <sup>-3</sup>	10 µg m <sup>-3</sup>	35 µg m <sup>-3</sup>	12 µg m <sup>-3</sup>
<b>ZMVM</b>	87 µg m <sup>-3</sup>	29.5 µg m <sup>-3</sup>	87 µg m <sup>-3</sup>	29.5 µg m <sup>-3</sup>	57 µg m <sup>-3</sup>	27 µg m <sup>-3</sup>
<b>CDMX</b>	55 µg m <sup>-3</sup>	23.1 µg m <sup>-3</sup>	55 µg m <sup>-3</sup>	23.1 µg m <sup>-3</sup>	43 µg m <sup>-3</sup>	22 µg m <sup>-3</sup>
<b>Área cornubada (EdoMéx)</b>	87 µg m <sup>-3</sup>	29.5 µg m <sup>-3</sup>	87 µg m <sup>-3</sup>	29.5 µg m <sup>-3</sup>	57 µg m <sup>-3</sup>	27 µg m <sup>-3</sup>

\*\* Aquellas concentraciones que superan los valores límite de la NOM, el estándar de la US EPA o el valor guía de la OMS se indican en color rojo.

Para evaluar el cumplimiento de las NOM's es necesario contar con herramientas de medición y monitoreo –Sistema de Monitoreo Atmosférico, Inventario de Emisiones, Índice de Calidad del Aire, entre otros, que nos permitan implementar acciones de mejora de la calidad del aire. Actualmente existe un Inventario Nacional de Emisiones (INEM), que contiene información sobre la cantidad y tipo de contaminantes que generamos, por fuente emisora y entidad federativa. También prevalece, el Índice de Calidad del Aire y Riesgos a la Salud (Índice Aire y salud), con el objetivo de informar de manera clara y oportuna el estado de la calidad del aire, los probables daños a la salud que ocasiona y las recomendaciones para reducir la exposición de los grupos sensibles y la población en general (SEMARNAT, 2019).

El Índice Aire y Salud, estandariza el método para la obtención y difusión de los niveles de contaminación en todo México, al ser de observación obligatoria, promueve el monitoreo de la calidad del aire en todas las ciudades y zonas metropolitanas del país, así como el desarrollo de programas locales para la comunicación y prevención de riesgos en salud. El Índice Aire y Salud (Tabla 3), relaciona la concentración de cada contaminante criterio con una categoría de calidad del aire, asignando un nivel de riesgo y las recomendaciones para la protección de los grupos sensibles y la población en general (SEDEMA, 2019).

El Índice Aire y Salud asigna la categoría Aceptable cuando la concentración máxima de cualquiera de los contaminantes reportados por la estación es menor o igual al valor límite de la Norma Oficial Mexicana por lo que se considera satisfactorio y con un nivel de bajo riesgo para la salud cuando las concentraciones correspondan a las categorías Buena y Aceptable, sin embargo, para cualquier categoría superior existirá algún tipo de riesgo (SEDEMA, 2019).

Es importante mencionar que en el Índice Aire y Salud se calcula un indicador estadístico específico (promedio móvil de 8 horas), para cada uno de los contaminantes criterio y a esta concentración se le asigna una categoría dentro de cinco bandas de color similar al Índice anterior de calidad del aire: verde, amarilla, naranja, rojo y morado, y señala el nivel de riesgo para la salud.

En la Ciudad de México, el Índice Aire y Salud se reporta cada hora los 365 días del año, para cada una de las 29 estaciones automáticas de monitoreo de la calidad del aire.

**Tabla 3.** Categorías del Índice Aire y Salud dependiendo del nivel de riesgo asociado.

Índice AIRE Y SALUD	Nivel de riesgo asociado	Recomendaciones	
		Grupos sensibles	Para toda la población
<b>Buena</b>	<b>Bajo</b> Se considera que el riesgo es mínimo.	Disfruta las actividades al aire libre.	
<b>Aceptable</b>	<b>Moderado</b> Las personas sensibles pueden experimentar síntomas respiratorios (asmáticos), posible agravamiento de enfermedad pulmonar y cardíaca en personas con enfermedad cardiopulmonar y adultos mayores.	Considera reducir las actividades físicas vigorosas al aire libre.	Disfruta las actividades al aire libre.
<b>Mala</b>	<b>Alto</b> Para todos los contaminantes criterio existe probabilidad de disminución en la capacidad pulmonar en personas sanas. Incremento en la probabilidad de aparición de síntomas respiratorios en personas sensibles (niños, ancianos, personas con deficiencias nutricionales, personas que realizan actividades en exteriores, ciclistas, trabajadores).  En personas con enfermedades respiratorias (EPOC, asma) y cardíacas (angina de pecho) hay aumento en la probabilidad de agravamiento y disminución en la tolerancia de la actividad física, así como mayor probabilidad de muertes prematuras en personas con enfermedad cardíaca o pulmonar	Evita las actividades físicas (tanto moderadas como vigorosas) al aire libre.	Reduce las actividades físicas vigorosas al aire libre.
<b>Muy Mala</b>	<b>Muy Alto</b> Para todos los contaminantes criterio, mayor probabilidad de presencia de síntomas respiratorios en población general. Agravamiento de síntomas respiratorios en poblaciones sensibles (niños, adultos mayores, personas que trabajan en exteriores, ciclistas) y en personas con enfermedad pulmonar (EPOC y asma).  Incremento en síntomas cardiovasculares, como dolor precordial, en personas enfermas del corazón, así como mayor probabilidad de muertes prematuras en personas con enfermedad cardíaca o pulmonar.	- No realices actividades al aire libre. - Acudir al médico si se presentan síntomas respiratorios o cardíacos.	Evita las actividades físicas moderadas y vigorosas al aire libre.
<b>Extremadamente Mala</b>	<b>Extremadamente Alto</b> Para todos los contaminantes criterio, incremento en la probabilidad de síntomas severos respiratorios en población general.  Serios efectos respiratorios y agravamiento de síntomas en personas sensibles (niños, adultos mayores, persona con deficiencias nutricionales) y en personas con enfermedad pulmonar (asma y EPOC). Agravamiento de síntomas cardiovasculares en enfermos del corazón (como angina de pecho) e incremento en la probabilidad de muerte prematura en personas con enfermedad pulmonar y cardíaca.	- Permanece en espacios interiores. - Acudir al médico si se presentan síntomas respiratorios o cardíacos.	

### **3.6. Antecedentes de exposición personal a PM<sub>2.5</sub>.**

La exposición es el contacto entre un contaminante en el aire y una superficie del cuerpo humano, ya sea externo (por ejemplo, la piel) o interno (por ejemplo, epitelio del tracto respiratorio). Por lo tanto, la exposición requiere la ocurrencia simultánea de dos eventos: una concentración de contaminantes en un lugar y tiempo en particular, y la presencia de una persona en ese lugar y tiempo (Duan, 1982; Ott, 1985). Las concentraciones de contaminantes experimentadas por un individuo durante las actividades diarias normales se denominan exposiciones personales o individuales. Una exposición personal depende de las concentraciones de contaminantes del aire presentes en los lugares por los que se mueve la persona, así como del tiempo que pase en cada lugar (Spengler et al., 1985; Wallace et al., 1985).

La exposición diaria de una persona a contaminantes del aire es la suma de sus exposiciones en diversos espacios a lo largo del tiempo, estos espacios particulares de exposición se conocen como microambientes y pueden variar a lo largo del día. Además, la exposición de las personas depende de su patrón tiempo-actividad, es decir, dónde están, qué hacen y cuánto tiempo pasan en cada microambiente y es el producto de la concentración del contaminante en particular por el tiempo que permaneció la persona en cada uno de estos microambientes y mientras más microambientes se estudien, se obtiene una mejor valoración de la exposición diaria (INECC, 2017).

La contaminación de espacios interiores puede representar un riesgo importante para la salud humana, si se considera que en general la población permanece más del 80% de su tiempo en ambientes interiores y hasta un 60% de éste en sus hogares. En entornos urbanos la contaminación de interiores depende de un gran número de factores tales como las fuentes y las tasas de emisión, la tasa de intercambio de aire, la penetración de contaminantes al ambiente interior y la tasa de absorción o remoción de contaminantes (INECC, 2017).

Los estudios que abordan la exposición personal a la contaminación del aire en los microambientes de transporte han cobrado relevancia durante la última década (Quiros et al., 2013; Okokon et al., 2017; Hernández-Paniagua et al., 2018; Velasco et al., 2019). Estos han demostrado que los pasajeros de medios de transporte, reciben una proporción significativa de su exposición diaria de los contaminantes del aire en el período relativamente corto en el que se desplazan hacia y desde las áreas urbanas (Smith et al., 2016). Contaminantes emitidos en los microambientes de transportes como el  $PM_{2.5}$  emitido principalmente de vehículos con motor diésel, se ha demostrado que está asociado con efectos adversos para la salud cardíaca y respiratoria (Peters et al., 2004). Del mismo modo, se tiene evidencia de que el sector del transporte es responsable de proporciones significativas de estos contaminantes en la atmósfera urbana, con concentraciones particularmente elevadas medidas cerca de arroyos vehiculares y dentro del mismo arroyo (Artiñano et al., 2007). Igualmente, las concentraciones de exposición han mostrado una gran variabilidad desde un lugar a otro en todo el mundo y, como resultado, la exposición personal de un lugar no se puede aplicar necesariamente a otro (Artiñano et al., 2007).

Si bien, las concentraciones de exposición a  $PM_{2.5}$  varían entre medios de transporte, estudios preliminares realizados en el metro y Metrobús de la ZMVM han mostrado que la población que usa el Metrobús durante las horas pico de tráfico vehicular experimenta niveles de exposición de hasta 3 veces aquellas que experimenta la población que usa el metro (Tiburcio, 2019). Además, se ha observado que en varias regiones dentro de la ZMVM existen picos de exposición a  $PM_{2.5}$  significativamente mayores que las concentraciones promedio lo que pudiera representar un riesgo para la salud de la población que experimenta dichos picos de forma recurrente.

No obstante, en México no se han considerado las variaciones temporales en la exposición personal; y a menudo se han omitido factores importantes como las variables meteorológicas y de tráfico, así como las condiciones de las flotas vehiculares y las configuraciones de operación (Artiñano et al., 2007; Quirós et al.,

2013). Aunque en escalas diarias de tiempo los periodos de tránsito dentro de la ciudad representan solo entre 5 y 10 %. Los usuarios de transporte pueden experimentar exposiciones significativas a  $PM_{2.5}$  en estos periodos (Smith et al., 2016). Por lo tanto, es necesario realizar mediciones de la concentración de  $PM_{2.5}$ , para evaluar su comportamiento en el espacio y tiempo, lo que pueda permitir informar a las autoridades ambientales de dichos valores con miras a implementar medidas de control efectivas para reducir emisiones vehiculares y estrategias de mitigación.

### **3.7. La exposición personal en la ZMVM.**

Hernández-Paniagua et al. (2018) realizaron recientemente la evaluación de la exposición personal y la inhalación de  $PM_{2.5}$  para cinco modos de transporte (caminando, bicicleta, autobús público (trolebús y autobús diésel), automóvil convencional (CC) y automóvil híbrido-eléctrico (HEC)) en dos rutas de distancia similar a lo largo de una avenida típica (Miguel Ángel de Quevedo) de la Ciudad de México. Ellos determinaron promedios aritméticos de exposición de  $16.5 \pm 6.5 \mu\text{g m}^{-3}$  para el recorrido a pie,  $81.7 \pm 9.1 \mu\text{g m}^{-3}$  en bicicleta, mientras que, para el autobús público, el CC y HEC fueron de  $49.8 \pm 5.3 \mu\text{g m}^{-3}$ ,  $28.3 \pm 8.5 \mu\text{g m}^{-3}$  y  $20.3 \pm 4.2 \mu\text{g m}^{-3}$ , respectivamente. En todos los modos de transporte no hubo diferencias significativas con las medias geométricas. Las mediciones de  $PM_{2.5}$  mostraron una gran heterogeneidad espacial en los niveles de exposición para caminar y andar en bicicleta, mientras que los autobuses públicos y el transporte privado mostraron una menor variación.

En otro estudio realizado en la Ciudad de México, se realizó el análisis estadístico descriptivo para determinar la exposición personal a  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$  de los pasajeros en el sistema de transporte público denominado Metrobús en el corredor de Av. Insurgentes. Las concentraciones aritméticas promedio de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  muestreadas con bombas portátiles SKC fueron  $194 \mu\text{g m}^{-3}$  y  $111 \mu\text{g m}^{-3}$ , respectivamente, para el recorrido completo (Indios Verdes – La Bombilla), y de  $318 \mu\text{g m}^{-3}$  y  $209 \mu\text{g m}^{-3}$  para el recorrido norte (Indios Verdes – Reforma), respectivamente (INECC, 2004). Al comparar las medianas de  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$ , se

encontró que la exposición personal en Metrobús fue menor que la mostrada en autobuses públicos y microbuses que transitaban por la misma zona (INECC, 2004).

Vallejo et al. (2004) describieron la exposición personal de los residentes de la CDMX a  $PM_{2.5}$  durante sus actividades diarias incluyendo un total de 40 voluntarios sanos (30 mujeres y 10 hombres) con actividades sedentarias. Ellos reportaron que la concentración media general de  $PM_{2.5}$  en microambientes exteriores ( $89.50 \mu\text{g m}^{-3}$ ) fue mayor que en interiores ( $67.55 \mu\text{g m}^{-3}$ ) y que las concentraciones de  $PM_{2.5}$  en la mañana fueron más elevadas que al final de la tarde.

En el microambiente interior, la concentración más alta ocurrió en el metro ( $106.2 \mu\text{g m}^{-3}$ ), seguida de la escuela ( $93.27 \mu\text{g m}^{-3}$ ), y la más baja en el hogar ( $53.1 \mu\text{g m}^{-3}$ ). El microambiente al aire libre con las concentraciones más altas fue el autobús ( $99.95 \mu\text{g m}^{-3}$ ), mientras que el automóvil tuvo concentraciones más bajas ( $64.9 \mu\text{g m}^{-3}$ ).

Además, Vallejo et al. (2004) identificaron que la zona geográfica con la concentración más alta de  $PM_{2.5}$  fue el área del centro de la Ciudad de México ( $87.87 \mu\text{g m}^{-3}$ ) y la de concentración más baja fue el área noreste ( $50 \mu\text{g m}^{-3}$ ). Todas las diferencias entre las concentraciones fueron significativas ( $p < 0.05$ ). Los estudios existentes establecieron rangos de concentraciones de  $PM_{2.5}$  a los que las personas están expuestas durante el transporte diario en la Ciudad de México. Sin embargo, dichos estudios reportan una gran variabilidad en la información reportada además que algunos fueron realizados hace casi 20 años, lo cual remarca la necesidad de contar con información actualizada sobre la exposición personal a  $PM_{2.5}$ .



---

## 4. METODOLOGÍA

---

### 4.1 Diseño experimental de campañas de monitoreo.

Para el muestreo de  $PM_{2.5}$ , se establecieron y llevaron a cabo campañas de monitoreo en las líneas del Metrobús seleccionadas. La Tabla 4 presenta el calendario de muestreos realizados en el presente estudio.

*Tabla 4. Calendario de las campañas de muestreo de partículas  $PM_{2.5}$  en el Metrobús.*

Temporada	Línea	Fecha
Seca Fría	1	25 de octubre de 2017
		24 de octubre de 2018
		11 de febrero de 2019
		15 de febrero de 2019
		19 de febrero de 2019
		21 de febrero de 2019
	2	08 de noviembre de 2017
		31 de octubre de 2018
		07 de noviembre de 2018
Seca Caliente	1	25 de febrero de 2019
		18 de abril de 2018
	2	03 de abril de 2019
		25 de abril de 2018
		08 de mayo de 2019
		23 de mayo de 2019

Durante los días enlistados, se monitorearon diferentes líneas del Metrobús de la CDMX, con la finalidad de medir los niveles de exposición personal a  $PM_{2.5}$  de usuarios que utilizan este transporte en horarios pico de tráfico vehicular. Específicamente se monitorearon las líneas 1, 2 y 7, con rutas de La Joya – Indios Verdes, Tacuba – Tepalcates y Campo Marte – Indios Verdes, respectivamente.

Se establecieron dos horarios de muestreo con el propósito de determinar los niveles y la variación de las concentraciones de exposición a  $PM_{2.5}$  que están sometidos los usuarios del Metrobús durante las horas típicas de traslado dentro de la CDMX. Se realizaron dos viajes por horario, un horario matutino de 07:00 a 11:00 CDT aprox. y uno vespertino de 17:00 a 20:00 CDT aprox.

Se seleccionaron días que permitieran tener representación temporal de la exposición a  $PM_{2.5}$  durante la temporada seca fría (noviembre a febrero) y seca caliente (marzo a mayo) del año, ya que son los periodos que presentan las mayores concentraciones en el ambiente de  $PM_{2.5}$ . No se realizaron mediciones en la temporada húmeda y de lluvias durante los meses de junio y agosto debido a que son los que presentan los menores niveles en el ambiente de  $PM_{2.5}$ .

En todos los trayectos y viajes realizados en las campañas, las mediciones de  $PM_{2.5}$  se realizaron en los vagones finales e intermedios del autobús, con una ubicación intermedia entre las ventanillas y puertas del mismo, y la sección central (Fig. 5). También, se tomaron registros de la hora exacta de apertura y cierre de puertas en cada estación, así como de las características, condiciones y tecnología del autobús utilizado y las observaciones relevantes de cada viaje.



**Figura 5.** Ubicación dentro de un camión de Metrobús para realizar las mediciones de las concentraciones de  $PM_{2.5}$ .

Una vez recolectados los datos de las campañas de monitoreo, los días posteriores a las campañas se descargaron y respaldaron los datos obtenidos para su posterior análisis. Se utilizó el software pDR Port (2.0.2.5) (ThermoScientific, 2019), el cual usa una interfaz gráfica que genera formatos universales de valores

separados por coma \*.CSV para reportar las concentraciones de  $PM_{2.5}$ , fecha y hora de cada medición (Fig. 6). Las bases de datos obtenidas se analizaron usando el software RStudio v1.2.5001 (RStudio, 2019) y Microsoft Excel.



*Figura 6. Descarga de datos de las campañas de monitoreo de  $PM_{2.5}$ .*

Para referenciar los niveles de exposición a  $PM_{2.5}$  observados en el Metrobús, se compararon los datos medidos en cada campaña con el monitor personal pDR-1500 y los datos obtenidos del análisis gravimétrico de cada muestreo. La gravimetría y los light scattering detectors son una de las alternativas más utilizadas para medir partículas (Wang, et al., 2016). La gravimetría es un método que recoge la muestra haciendo pasar un volumen conocido de aire a través de un filtro previamente pesado. El filtro se acondiciona antes de ser pesado en una cámara de humedad controlada a temperatura constante, durante un tiempo de 24 horas. Este proceso se realiza tanto en la pesada previa a la toma de muestra, como a la posterior de la misma. La diferencia de peso entre ambas pesadas corresponde a la cantidad de materia particulada referida en el filtro, a partir de la cual se obtiene la concentración de materia particulada en microgramos por metro cubico de aire.

De la comparación entre observaciones de los datos obtenidos de los medidores personales fotométricos pDR-1500 y los datos recabados del análisis gravimétrico, se determinó un factor de corrección y se calibraron los datos de las

concentraciones de  $PM_{2.5}$  en el Metrobús con la finalidad de obtener resultados precisos que nos permitieran validar los datos obtenidos de los niveles de exposición personal de  $PM_{2.5}$  en los microambientes de estudio.

Finalmente, con los datos calibrados de exposición a  $PM_{2.5}$  obtenidos en las campañas de monitoreo, se realizó el análisis estadístico de los mismos. Se elaboró una representación simplificada de la distribución y los niveles de  $PM_{2.5}$  en las diferentes rutas del Metrobús, utilizando variables de tendencia central y no central en gráficos tipo box-plot, que fueron elaborados con los paquetes reshape2 (1.4.3) y ggplot2 (3.2.1) del software RStudio (RStudio, 2019).

## **4.2 Instrumentos de medición**

Para la medición de  $PM_{2.5}$  al interior de los microambientes de trabajo, se emplearon los siguientes equipos portátiles de medición.

### **Monitor de aerosoles personal (pDR-1500)**

El pDR-1500 personal Thermo Scientific (ThermoFisher Scientific, Inc, 2019) es un monitor nefelométrico altamente sensible (precisión  $\pm 2\%$  de lectura o  $\pm 0.005 \text{ mg m}^{-3}$  y un rango de medición de concentración de  $0.001$  a  $400 \text{ mg m}^{-3}$ ), cuya configuración de detección de dispersión de luz ha sido optimizada para la medición de la fracción respirable de polvo, humo y nieblas en el aire, en entornos industriales y otros interiores y exteriores. Este instrumento de muestreo personal de aerosoles con control volumétrico incorpora bajo su banco óptico un portafiltro de 37 mm sobre el cual se recogen todas las partículas muestreadas para su posterior análisis o referencia gravimétrica (Fig. 7.) El pDR-1500 está equipado para ofrecer compensación de la humedad relativa y flujo volumétrico real (con un rango de  $1.0$  a  $3.5 \text{ L min}^{-1}$ ) (ThermoFisher Scientific, Inc, 2019).

En los equipos de muestreo personal de aerosoles (pDR-1500), el aire ambiente se introduce al sistema mediante una bomba de succión, depositando las partículas  $PM_{2.5}$  de manera intermitente en un filtro de fibra de vidrio. El impacto de la masa

de  $PM_{2.5}$  en el medio filtrante se realiza en periodos de tiempo previamente establecidos. Se irradia radiación beta de bajo nivel a través de las partículas depositadas. La capa de partículas, que va en aumento, reduce la intensidad del haz de radiación beta en la sección, la cual es medida por una cámara de ionización como detector (Nolasco, 2015). La señal eléctrica de salida es proporcional a la masa real muestreada. La concentración de las partículas se calcula a partir del aumento temporal de la masa de estas.



*Figura 7. Equipo pDR-1500 (Página oficial ThermoFisher Scientific, Inc, 2019).*

El monitor de aerosoles pDR-1500, lleva incorporado un ciclón de medición azul para conseguir y asegurar puntos de corte para partículas  $PM_{2.5}$  (Fig. 8). El ciclón azul aprovecha la dinámica de las partículas para que, a cierta velocidad de flujo, las partículas mayores a  $2.5 \mu m$  sean impactadas en algún sistema de retención y no lleguen hasta el filtro de muestra. De esta manera solo las partículas menores o iguales a  $2.5 \mu m$  son transportadas y depositadas en el filtro de muestra, para posteriormente ser medidas y permitir la validación posgravimétrica de todos los datos.



*Figura 8. "Ciclón Azul" ( $1 - 4 \mu m$ ).*

Para realizar el muestreo de partículas  $PM_{2.5}$ , el equipo pDR-1500 fue portado cerca del área respiratoria y para simular que la medición fuera a la altura nasal se utilizó una manguera de silicona con pared interna lisa (longitud 0.55 m, d.i. 8/16”). Durante todas las mediciones se verificó la conexión de la manguera para evitar dobleces en la misma y asegurar la tasa constante de flujo durante todo el muestreo (1.52 LPM).

### Receptor satelital GPS

El GPS map 60CSx GARMIN es un instrumento de posicionamiento global que proporciona a los usuarios información sobre posición, navegación y cronometría (Fig. 9). Determina la localización en tiempo real y cuenta con un receptor GPS de alta sensibilidad, un altímetro barométrico y una brújula electrónica que permiten obtener datos de latitud, longitud, altitud y presión (GARMIN, 2019). El GPS map se utilizó para georreferenciar las mediciones de las concentraciones ambiente de  $PM_{2.5}$ .



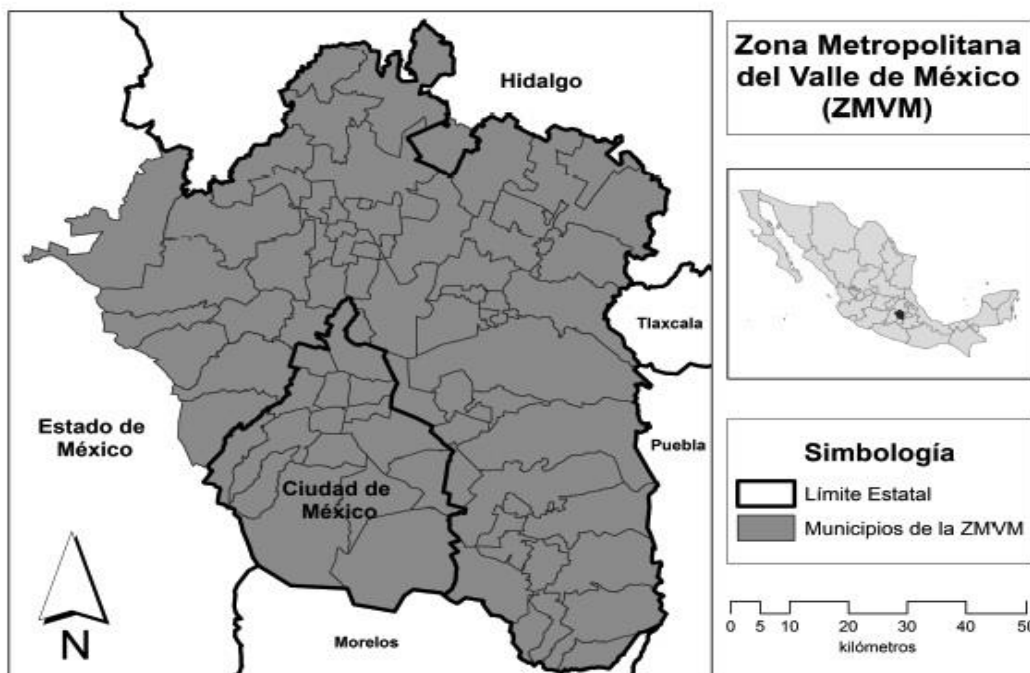
*Figura 9. GPS map 60CSx GARMIN (Página oficial GARMIN, 2019).*

Las actividades de operación, mantenimiento y calibración de los equipos anteriores se presentan en los anexos I y II.



### 4.3 Sitios de medición

El Valle de México se ubica sobre los 19°40' de Latitud Norte y 98°52' de Longitud Oeste, formando parte de una cuenca, la cual tiene una elevación promedio de 2,240 msnm y una superficie de 9,600 km<sup>2</sup>; presenta valles montañosos, mesetas y cañadas, así como terrenos semiplanos, en lo que alguna vez fueron los lagos de Texcoco, Xochimilco y Chalco; está integrada por una parte del Estado de México, el sur del Estado de Hidalgo, el sureste de Tlaxcala y casi la totalidad de la Ciudad de México.



*Figura 10. Mapa regional de la Zona Metropolitana del Valle de México (INEGI, 2012).*

La altitud a la que se ubica el Valle de México determina que el contenido de oxígeno sea 23% menor que a nivel del mar, lo cual tiende a hacer más contaminantes los procesos de combustión. Y al mismo tiempo, el entorno montañoso que rodea la zona constituye una barrera natural que dificulta la libre circulación del viento y la dispersión de los contaminantes. Por ello, es un medio propicio para la acumulación de los contaminantes atmosféricos (García, 2000).

Dentro del Valle se ubica la ZMVM, formada por la Ciudad de México y por 60 municipios aglomerados, uno de ellos en el Estado de Hidalgo, los restantes en el Estado de México (Fig. 10). La ZMVM cuenta con una superficie de 7954 Km<sup>2</sup>, 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 ejercen una influencia determinante sobre la calidad del aire existente en esta zona (García, 2000).

La Ciudad de México es su principal centro económico. El crecimiento económico es la fuerza fundamental que conlleva a la congestión vial y a la contaminación del aire, debido a que influye sobre las tasas de motorización, la generación de viajes y el crecimiento urbano (Molina, 2000). Ello ha sido especialmente importante en el proceso de crecimiento que ha experimentado la ZMVM. Sin embargo, con el aumento de la infraestructura, de vehículos y de kilómetros recorridos, los síntomas y efectos negativos de la congestión vial y la contaminación se han ido incrementando considerablemente (PROAIRE, 2018).

Las iniciativas en la ZMVM se dirigen no solo a mejorar la calidad del aire, sino también a facilitar el acceso a servicios y un desarrollo urbano más armonioso. Una de las iniciativas emblemáticas fue la introducción del sistema BRT (Metrobús) en la Ciudad de México y, en fechas más recientes, en algunos municipios del Estado de México (Mexibús). Otras mejoras incluyen el tren suburbano y la introducción de autobuses con estándares ambientales y de seguridad más altos. Si bien estas iniciativas representan pasos en la dirección correcta, aún se requieren mayores avances para conformar un marco coherente de políticas que garantice mejoras en la movilidad y la accesibilidad.



### **4.3.1 Metrobús de la Ciudad de México**

El Sistema de Corredores de Transporte Público de Pasajeros de la Ciudad de México, conocido como Metrobús, es un sistema de transporte que consta de un autobús de tránsito rápido y que presta servicio en la Ciudad de México.

El Metrobús cuenta con siete líneas, cada línea tiene asignado un número y un color distintivos. Tiene una extensión total de 125 kilómetros (Red de transporte más larga de Latinoamérica) y posee 239 estaciones y 4,915 camiones. Todas las estaciones se encuentran dentro de la Ciudad de México.

En esta sección se encuentra información adicional (cantidad de kilómetros recorridos, estaciones, terminales, demanda de usuarios y conectividad con otros sistemas de transporte) de cada una de las líneas que se van a monitorear en el presente trabajo.

- **Línea 1. Av. de los Insurgentes**

Fue la primera línea en construirse e inaugurarse. Está integrada por los corredores de transporte Metrobús Insurgentes y Metrobús Insurgentes Sur, cuenta con 47 estaciones en total y su color distintivo es el rojo. Está construida al centro de la Ciudad de México, con dirección Sur - Norte. Tiene una longitud de 28.1 Km y una demanda de 148 mil usuarios por día. Las terminales de esta línea son Indios Verdes y El caminero.

La línea 1 brinda servicio a las delegaciones: Gustavo A. Madero, Cuauhtémoc, Benito Juárez, Álvaro Obregón, Coyoacán y Tlalpan. Tiene transbordo gratuito con la línea 2 en las estaciones Nuevo León y Viaducto; la línea 3 en la estación Circuito, La Raza y Buenavista; con la línea 4 en las estaciones Buenavista y Plaza de la República; con línea 6 en la estación Deportivo 18 de marzo y con línea 7 en la estación Indios Verdes, Reforma y Hamburgo.

- **Línea 2. Eje 4 sur**

Segunda línea en construirse e inaugurarse y constituye el corredor de transporte denominado Metrobús Eje 4 Sur. Está construida al centro de la Ciudad de México, con dirección Oriente - Poniente, tiene 36 estaciones, una longitud de 20 kilómetros, una demanda aproximada de 180 mil usuarios por día y su color distintivo es el morado. Las terminales de la línea 2 son Tepalcates y Tacubaya.

La línea 2 brinda servicio en las delegaciones Miguel Hidalgo, Cuauhtémoc, Benito Juárez, Iztacalco e Iztapalapa. Tiene transbordo con la línea 1 en la estación Nuevo León, y con la línea 3 en la estación Etiopía - Plaza de la Transparencia.

- **Línea 7. Avenida Paseo de la Reforma**

Fue la séptima línea en construirse y constituye el corredor de transporte denominado Metrobús Corredor Reforma. Está construida al norte, centro y poniente de la Ciudad de México, con dirección Norte - Poniente, tiene una longitud de 15 kilómetros, 31 estaciones, una demanda aproximada de 130 mil usuarios por día y su color distintivo es el verde oscuro.

La línea corre desde el Centro de Transferencia Modal de Indios Verdes hasta el Campo Marte y brinda servicio en las delegaciones Miguel Hidalgo, Cuauhtémoc y Gustavo A. Madero.

El Metrobús línea 7 opera con autobuses de capacidad y tecnología de punta, que brinda movilidad urbana de manera rápida y segura por medio de la integración de una infraestructura preferente, operaciones rápidas y frecuentes y sistema de pago automatizado.

Los mapas de las rutas de las líneas del Metrobús aquí mencionadas se pueden encontrar en otro estudio de la exposición personal a PM2.5 en la Ciudad de México (Tiburcio, 2019).

A continuación, se describen los tipos de autobuses utilizados en las campañas de monitoreo de PM2.5 realizadas en el Metrobús.

- **Autobús Articulado:** Autobús de 18 metros de largo y capacidad para 160 personas (sustituye a 126 automóviles). Cuenta con un motor que funciona con diésel.



*Figura 11. Autobús Articulado (Portal oficial del Metrobús de la CDMX, 2019).*

- **Autobús Biarticulado:** Autobús de 24 metros de largo, capacidad para 240 personas y ahorrador de combustible. Para transportar 1000 personas en 10 km, 4 autobuses biarticulados utilizan 40 litros de combustible. Comparado con 835 automóviles y un gasto de 650 litros, que se utilizan para mover a la misma cantidad de personas. El ahorro es de 460,000 litros al día.



*Figura 12. Autobús Biarticulado (Portal oficial del Metrobús de la CDMX, 2019).*

- **Autobús de doble piso EURO VI:** Autobús de doble piso, capacidad para 130 personas (equivalente a 108 automóviles), panorámico y cuenta con Certificación Oficial Ambiental Euro VI. Es un autobús que cuenta con una tecnología de punta EPA/17 equivalente a Euro VI de bajas emisiones, ofrece mayor seguridad (videovigilancia con cámaras instaladas en el autobús), rapidez (Disminución de 40% en los tiempos de traslado) y confort en el traslado.



*Figura 13. Autobús doble piso EURO VI (Portal oficial del Metrobús de la CDMX, 2019).*

En la Tabla 5 se describen las características de los tipos de autobuses empleados en las campañas de muestreos.

**Tabla 5.** Descripción de los autobuses empleados en las campañas de muestreo de las líneas 1.2 y 7 del Metrobús.

Temporada	Línea	Fecha	Turno de viaje	Autobús	Serie	Marca	Características
Seca Fría	1	25/10/2017	Mañana Ida	Autobús	CISA-108	Volvo B12M	Motor diésel con tecnología Euro 3
			Mañana Regreso	Articulado	CISA-029	Volvo B12M	Motor diésel con tecnología Euro 3
			Tarde Ida	Autobús biarticulado	CISA-1034B	Volvo 7300 BRT	Motor diésel con tecnología Euro 5
			Tarde Regreso	Autobús Articulado	CISA-001	Volvo B12M	Motor diésel con tecnología Euro 3
		24/10/2018	Mañana Ida	Autobús Articulado	N / A	N / A	N / A
			Mañana Regreso		N / A	N / A	N / A
			Tarde Ida		N / A	N / A	N / A
			Tarde Regreso		N / A	N / A	N / A
		11/02/2019	Mañana Ida	Autobús biarticulado	CISA-120	Volvo 7300 BRT	Motor diésel con tecnología Euro 5
			Mañana Regreso		CISA-1112	Volvo 7300 BRT	Motor diésel con tecnología Euro 5
			Tarde Ida		RECSA-1095	Volvo 7300 BRT	Motor diésel con tecnología Euro 5
			Tarde Regreso		RECSA-1095	Volvo 7300 BRT	Motor diésel con tecnología Euro 5
		15/02/2019	Mañana Ida		CISA-1112	Volvo 7300 BRT	Motor diésel con tecnología Euro 5
			Mañana Regreso		CISA-109	Volvo 7300 BRT	Motor diésel con tecnología Euro 5
			Tarde Ida		CISA-1043	Volvo 7300 BRT	Motor diésel con tecnología Euro 5
			Tarde Regreso		CISA-1043	Volvo 7300 BRT	Motor diésel con tecnología Euro 5
		19/02/2019	Mañana Ida	CISA-109	Dina Brighter	Motor diésel con tecnología Euro 5	
			Mañana Regreso	CISA-109	Volvo 7300 BRT	Motor diésel con tecnología Euro 5	
			Tarde Ida	CE4-17M-340	Volvo 7300 BRT	Motor diésel con tecnología Euro 5	
			Tarde Regreso	RECSA-1095	Volvo 7300 BRT	Motor diésel con tecnología Euro 5	
		21/02/2019	Mañana Ida	CISA-1018	Volvo 7300 BRT	Motor diésel con tecnología Euro 5	
			Mañana Regreso	CISA-1018	Volvo 7300 BRT	Motor diésel con tecnología Euro 5	
			Tarde Ida	RECSA-1048	Volvo 7300 BRT	Motor diésel con tecnología Euro 5	
			Tarde Regreso	RECSA-1048	Volvo 7300 BRT	Motor diésel con tecnología Euro 5	
	2	08/11/2017	Mañana Ida	Autobús Articulado	CE4-17M-325	Dina Brighter	Motor diésel con tecnología Euro 5
			Mañana Regreso		CTT-361	Volvo 7300 BRT	Motor diésel con tecnología Euro 5
			Tarde Ida		CE4-17M-301	Volvo 7300 BRT	Motor diésel con tecnología Euro 5
			Tarde Regreso		CTT-373	Volvo 7300 BRT	Motor diésel con tecnología Euro 5

**Tabla 6. Continuación Tabla 5.**

Temporada	Línea	Fecha	Turno de viaje	Autobús	Serie	Marca	Características
Seca Fría	2	31/10/2018	Mañana Ida	Autobús Articulado	N / A	N / A	N / A
			Mañana Regreso		N / A	N / A	N / A
			Tarde Ida		CE4-17M-230	Volvo 7300 BRT	Motor diésel con tecnología Euro 5
			Tarde Regreso		N / A	N / A	N / A
	7	07/11/2018	Mañana Ida	Autobús de doble piso (Enviro 500)	OL7-1143	Enviro500 2017	Motor diésel en Tecnología Euro 6
			Mañana Regreso		SBR-915	Enviro500 2017	Motor diésel en Tecnología Euro 6
			Tarde Ida		OL7-822	Enviro500 2017	Motor diésel en Tecnología Euro 6
			Tarde Regreso		SBR-928	Enviro500 2017	Motor diésel en Tecnología Euro 6
		25/02/2019	Mañana Ida	Autobús de doble piso (Enviro 500)	OL7-827	Enviro500 2017	Motor diésel con tecnología Euro 6
			Mañana Regreso		OL7-818	Enviro500 2017	Motor diésel con tecnología Euro 6
			Tarde Ida		OL7-807	Enviro500 2017	Motor diésel con tecnología Euro 6
			Tarde Regreso		SBR-941	Enviro500 2017	Motor diésel con tecnología Euro 6
Seca Caliente	1	18/04/2018	Mañana Ida	Autobús biarticulado	VYC-1063	Volvo 7300 BRT	Motor diésel con tecnología Euro 5
			Mañana Regreso		CISA-1031	Volvo 7300 BRT	Motor diésel con tecnología Euro 5
			Tarde Ida		CISA-1031	Volvo 7300 BRT	Motor diésel con tecnología Euro 5
			Tarde Regreso		RECSA-1094	Volvo 7300 BRT	Motor diésel con tecnología Euro 5
		03/04/2019	Mañana Ida	Autobús biarticulado	CISA-1102	Volvo 7300 BRT	Motor diésel con tecnología Euro 5
			Mañana Regreso		CSA-1027	Volvo 7300 BRT	Motor diésel con tecnología Euro 5
			Tarde Ida		CISA-1021	Volvo 7300 BRT	Motor diésel con tecnología Euro 5
			Tarde Regreso		RECSA-1086	Volvo 7300 BRT	Motor diésel con tecnología Euro 5
	2	25/04/2018	Mañana Ida	Autobús biarticulado	CE4-17M-335	Dina Brighter	Motor diésel con tecnología Euro 5
			Mañana Regreso		PROT-14	Mercedes Benz Gran Viale	Motor diésel con tecnología Euro 5
			Tarde Ida		CE4-17M-314	Volvo 7300 BRT	Motor diésel con tecnología Euro 5
			Tarde Regreso		CTT-2354	Volvo 7300 BRT	Motor diésel con tecnología Euro 5
		08/05/2019	Mañana Ida	Autobús Articulado	TSA-343	Marco Polo	Motor diésel con tecnología Euro 3
			Mañana Regreso		CE4-17M-230	Volvo 7300 BRT	Motor diésel con tecnología Euro 5
			Tarde Ida		CE4-17M-230	Volvo 7300 BRT	Motor diésel con tecnología Euro 5
			Tarde Regreso		TSA-343	Marco Polo	Motor diésel con tecnología Euro 3
7	23/05/2018	Mañana Ida	Autobús de doble piso (Enviro 500)	OL7-818	Enviro500 2017	Motor diésel con tecnología Euro 6	
		Mañana Regreso		OL7-823	Enviro500 2017	Motor diésel con tecnología Euro 6	
		Tarde Ida		OL7-807	Enviro500 2017	Motor diésel con tecnología Euro 6	
		Tarde Regreso		OL7-809	Enviro500 2017	Motor diésel con tecnología Euro 6	

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 5.1 Factores de corrección para pDR.

A continuación, se presentan los resultados de los factores de corrección obtenidos para cada equipo pDR que se usaron para corregir las concentraciones de  $PM_{2.5}$  medidas durante todas las campañas de monitoreo.

#### 5.1.1 Factor de corrección para pDR 2.

Los factores de corrección de los equipos pDR se obtuvieron de la regresión lineal entre los valores de masas de  $PM_{2.5}$  medidos de las lecturas ópticas y las masas recolectadas en los mismos equipos, calculadas con las diferencias de pesos de los filtros mediante análisis gravimétricos. La regresión lineal obtenida es la siguiente:

$$y = \beta_1(\pm SE)x + \beta_0(\pm SE)$$

$$y = 0.3804x + 3.8768$$

$$R^2 = 0.8148$$

Donde  $y$  es el valor de masa de  $PM_{2.5}$  determinada por el pDR 2,  $x$  es el valor de masa recolectado en el filtro (masa de  $PM_{2.5}$  obtenida con gravimetría),  $\beta_1$  y  $\beta_0$  son coeficientes de regresión, y  $SE$  es el error estándar de los valores de  $\beta$ .

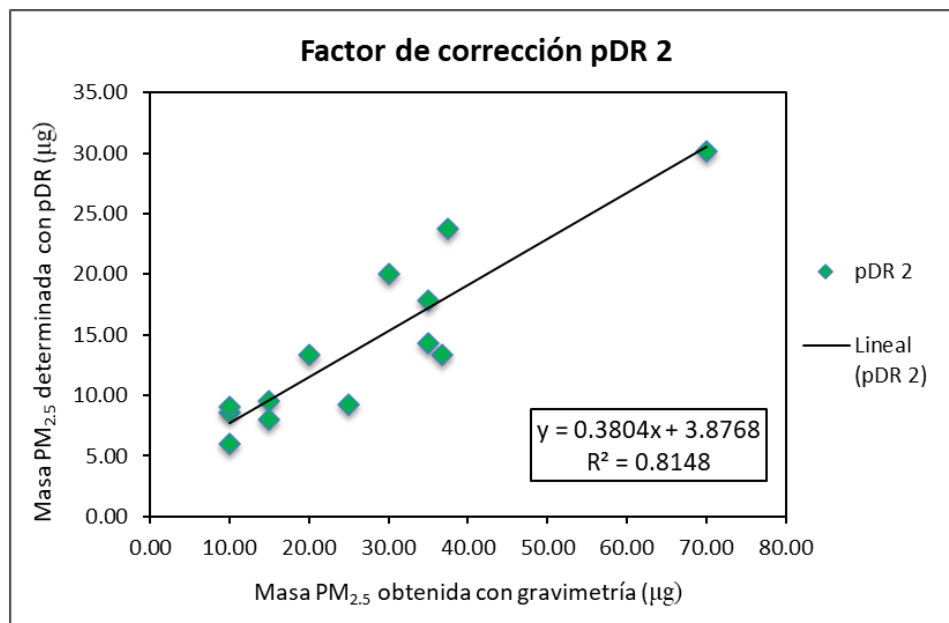


Figura 14. Regresión lineal entre determinaciones gravimétricas y lecturas ópticas para el pDR 2.

En la regresión lineal del equipo pDR 2, se encontró que la intersección de la regresión,  $\beta_0$ , es significativamente diferente de cero (3.8768), lo que indica un sesgo de los niveles de  $PM_{2.5}$  medidos con el pDR. La pendiente de la regresión,  $\beta_1$ , también fue significativamente menor que la unidad (0.3804), que indica que la lectura directa del pDR 2 mostró valores de masa de  $PM_{2.5}$  en promedio 60% más bajos que los valores de masa que se registraron en el pesado de los filtros. Es decir, la lectura directa del pDR 2 subestimó las concentraciones de  $PM_{2.5}$  en aproximadamente un 60 % en comparación con la determinada por gravimetría. Además, el valor de  $\beta_0 = 3.8768$  indica un sesgo de  $\pm 4 \mu g$  de la lectura directa de los valores de masa del pDR 2 en comparación con la masa recolectada en los filtros. Una posible explicación de tal sesgo puede estar relacionado con la no linealidad en la relación entre concentraciones medidas muy bajas, concentraciones de partículas de diferente composición y el contenido de humedad que afectan las lecturas ópticas.

No obstante, los valores de masa de  $PM_{2.5}$  determinados con ambos métodos mostraron una correlación significativa ( $R^2 = 0.8148$ ), lo que permitió utilizar los coeficientes de la regresión obtenida para corregir las lecturas en campo (Wang et al., 2016).

La ec. del factor de corrección es la siguiente:

$$Y = \left( \frac{X - 3.8768}{0.3804} \right)$$

Donde Y es igual al valor corregido para las lecturas de concentración de  $PM_{2.5}$  en el pDR y X es igual al valor no corregido de las lecturas de concentración de  $PM_{2.5}$  en el pDR. De manera que:

$$\text{Valor Corregido} = \left( \frac{\text{Valor no corregido} - 3.8768}{0.3804} \right)$$



### 5.1.2 Factor de corrección para pDR 3.

Para obtener el factor de corrección del pDR 3 se realizó la regresión lineal entre la masa de PM<sub>2.5</sub> determinada con el pDR 2 y la masa determinada con pDR 3 (Figura 15). Dicha regresión es posible ya que ambos pDRs operaron siempre al mismo flujo de 1.52 L min<sup>-1</sup> y estuvieron próximos durante las mediciones en campo, por lo cual se puede asumir que son réplicas de medición y que las lecturas del pDR 3 se pueden corregir de forma indirecta utilizando las lecturas del pDR 2 si los resultados del análisis de regresión son significativos. La regresión lineal obtenida para el pDR 3 es la siguiente:

$$y = \alpha_1(\pm SE)x + \alpha_0(\pm SE)$$

$$y = 0.9399 x$$

$$R^2 = 0.9812$$

Donde  $y$  es el valor de masa de PM<sub>2.5</sub> determinado con el pDR 2,  $x$  es el valor de masa de PM<sub>2.5</sub> determinado con el pDR 3,  $\alpha_1$  y  $\alpha_0$  son coeficientes de regresión, y SE es el error estándar de los valores de  $\alpha$ .

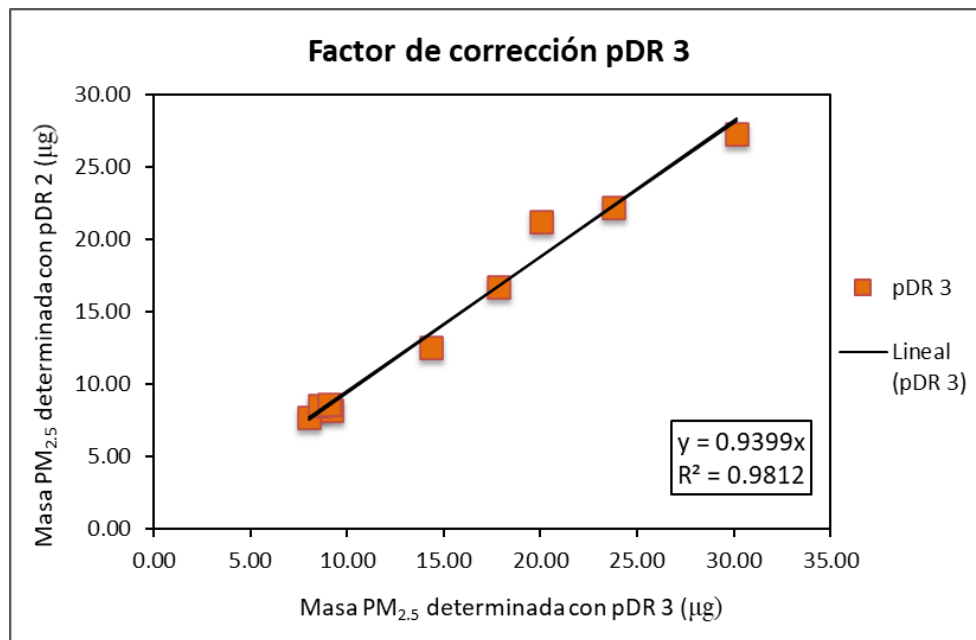


Figura 15. Factor de corrección del pDR 3.

La Figura 15 muestra que la intersección de la regresión,  $\alpha_0$ , es igual a 0 y la pendiente de regresión,  $\alpha_1$ , es significativamente cercana a 1 (1.064). Por lo anterior, se puede concluir que los dos instrumentos responden de forma proporcional y tienen un comportamiento lineal. Posteriormente, los valores no corregidos de las concentraciones de  $PM_{2.5}$  determinados con el pDR 3 se corrigieron de forma indirecta con la siguiente ecuación obtenida para el pDR 2:

$$Y = 1.064 \cdot \left( \frac{X - 3.8768}{0.3804} \right)$$

Donde Y es igual al valor corregido para las lecturas de concentración de  $PM_{2.5}$  en el pDR y X es igual al valor no corregido de las lecturas de concentración de  $PM_{2.5}$  en el pDR. De manera que:

$$\text{Valor Corregido} = 1.064 \times \left( \frac{\text{Valor no corregido} - 3.8768}{0.3804} \right)$$

Finalmente, con los valores de concentración de  $PM_{2.5}$  corregidos, se realizaron los análisis de las series de tiempo de todas las campañas y se construyeron los gráficos de caja y bigotes correspondientes que se presentan en la siguiente sección.

## **5.2 Series de tiempo de las campañas de muestreo.**

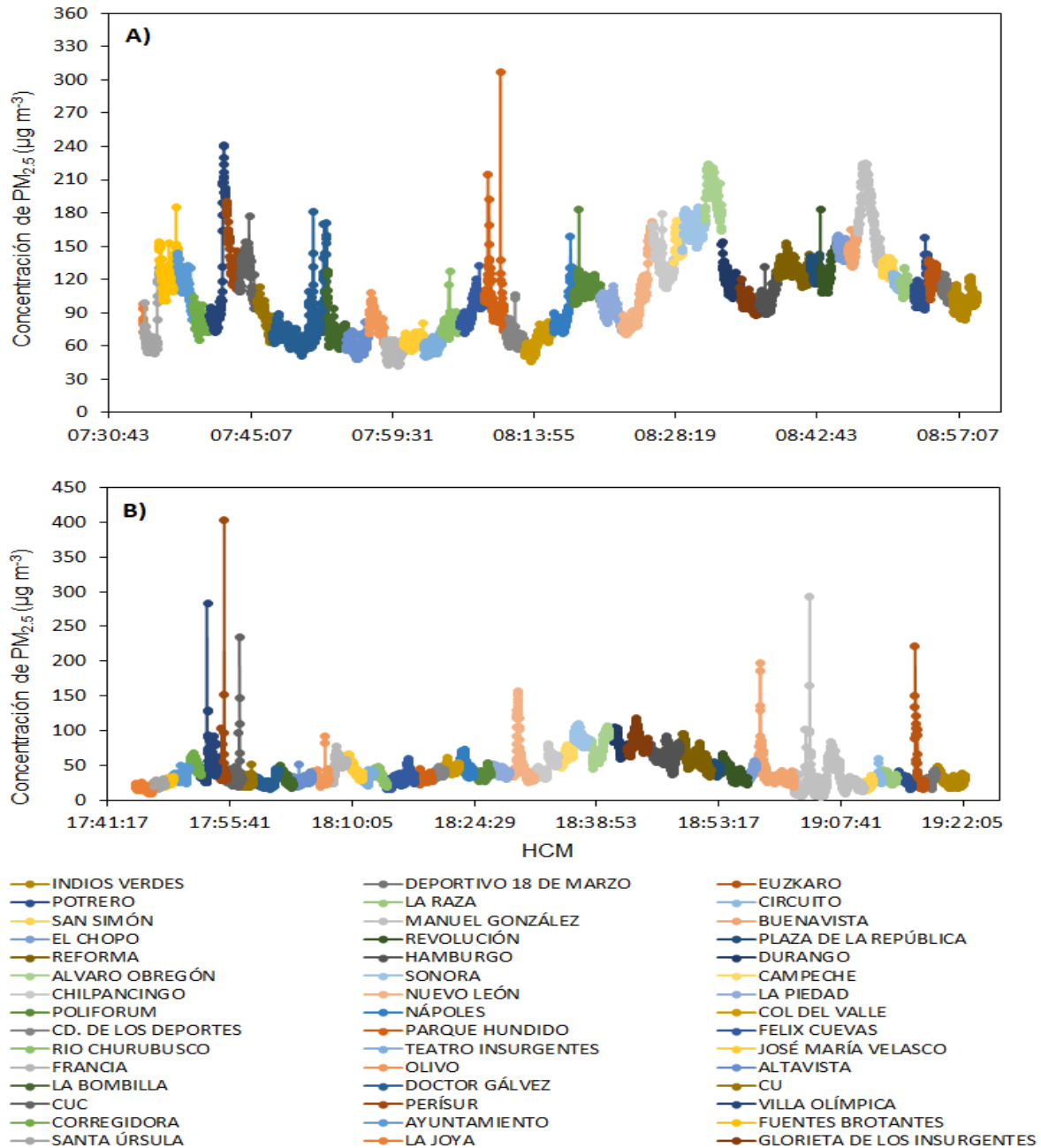
### **5.2.1 Series de tiempo de la línea 1 del Metrobús.**

En esta sección se presentan las series de tiempo más representativas de las concentraciones ambiente de  $PM_{2.5}$  que se midieron en las campañas de muestreo de la línea 1 del Metrobús durante el periodo de muestreo 2017-2019. Los trayectos recorridos de esta línea fueron dos: un primer trayecto (de ida) de La Joya a Indios Verdes y un segundo trayecto (de vuelta) de Indios Verde a La Joya.

La Figura 16 muestra los perfiles de concentración de  $PM_{2.5}$  de dos viajes de ida realizados en la línea 1 del Metrobús para una misma campaña (21-02-2019), en ambos viajes el monitoreo se realizó en autobuses con tecnología Euro V. Se puede observar que las concentraciones de  $PM_{2.5}$  son más elevadas en la mañana que en la tarde. Los valores de concentración ambiente de  $PM_{2.5}$  se mantienen en su mayoría constantes a lo largo de todo el trayecto de la tarde, con valores entre 10 y  $100 \mu\text{g m}^{-3}$ , mientras que en la mañana los valores ascienden a 50 y  $250 \mu\text{g m}^{-3}$ , lo que también se puede evidenciar con la presencia de múltiples picos de alta concentración de  $PM_{2.5}$  que coincidieron con las estaciones: Villa Olímpica ( $240 \mu\text{g m}^{-3}$ ), Perisur ( $190 \mu\text{g m}^{-3}$ ), Doctor Gálvez ( $180 \mu\text{g m}^{-3}$ ), Parque Hundido ( $320 \mu\text{g m}^{-3}$ ) y Manuel González ( $230 \mu\text{g m}^{-3}$ ).

En ambos viajes se pueden observar picos de concentración de  $PM_{2.5}$  en estaciones como Villa Olímpica, Perisur, Nuevo León, Reforma, Buenavista y Manuel González, estaciones relacionadas con transbordos entre estaciones de la línea 2 y 4 del Metrobús e intersecciones con vías principales de modos de transporte que están influenciadas positivamente por la densidad del tráfico.

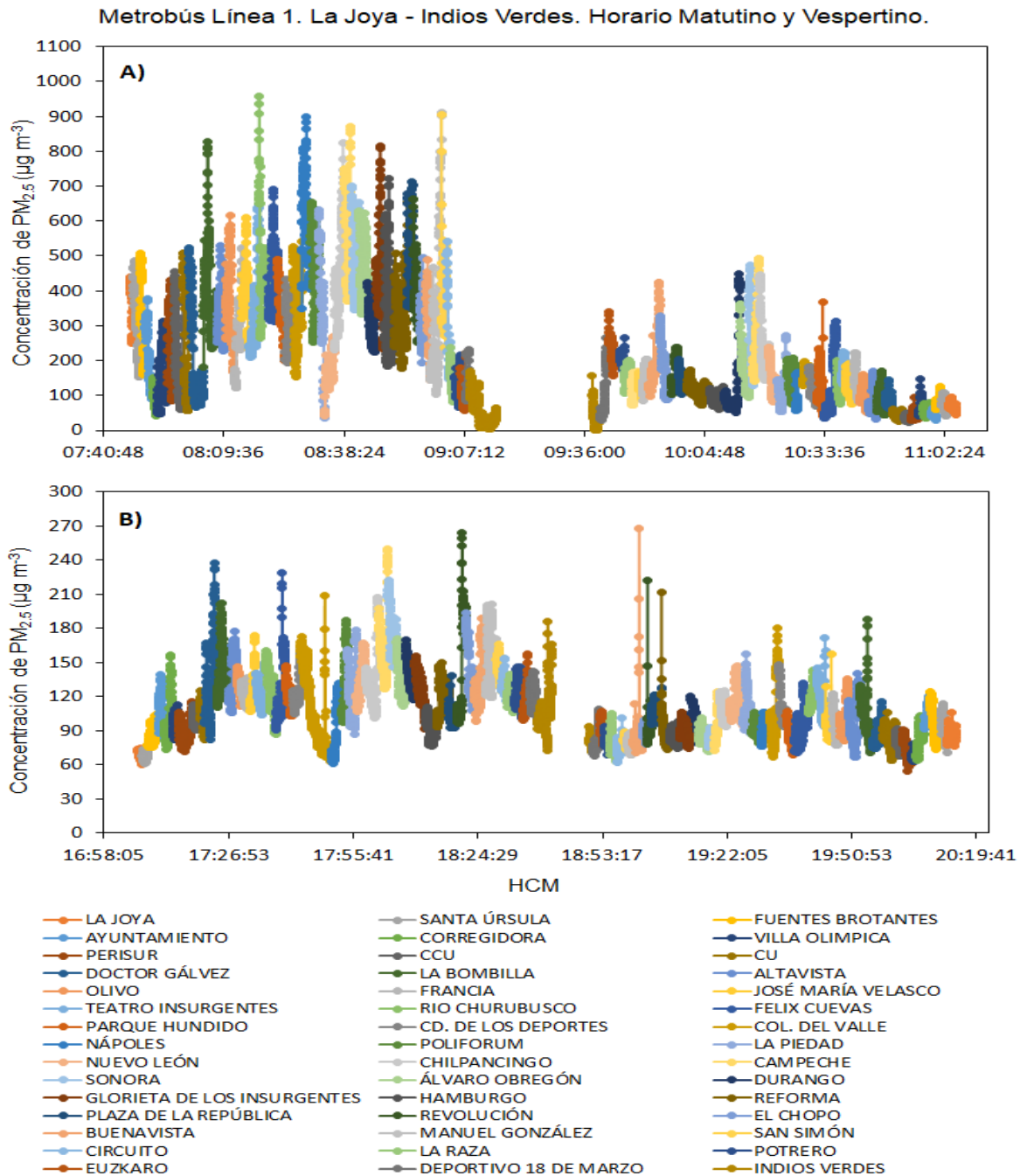
Metrobús Línea 1. La Joya - Indios Verdes. Horario Matutino y Vespertino.



**Figura 16.** Series de tiempo de las concentraciones ambiente de  $PM_{2.5}$  de dos viajes realizados en la línea 1 del Metrobús (campeña 21-02-2019). A) Horario matutino y B) Horario vespertino.

Del mismo modo, la Figura 17 muestra nuevamente mayores niveles de concentración de  $PM_{2.5}$  por la mañana, a pesar de ser un año diferente de muestreo, sin embargo, podemos observar que para este día (25-10-2017), específicamente

para el viaje de ida, los niveles de exposición a  $PM_{2.5}$  se incrementaron considerablemente, con valores que oscilaron entre 50 y  $600 \mu g m^{-3}$ , mientras que en el trayecto de regreso las concentraciones variaron entre 50 y  $300 \mu g m^{-3}$ . En el viaje de la mañana se encontraron concentraciones superiores a los  $600 \mu g m^{-3}$ .



**Figura 17.** Series de tiempo de las concentraciones ambiente de  $PM_{2.5}$  de dos viajes realizados en la línea 1 del Metrobús. A) Viaje completo de la mañana de la campaña 25-10-2017 y B) Viaje completo de la tarde de la campaña 03-04-2019.

De lo reportado en bitácoras y lo registrado en la Tabla 5, el viaje de la mañana de la campaña del 25-10-2017 se realizó en un autobús articulado marca Volvo B12M con tecnología Euro 3. Este tipo de autobuses no cuenta con Certificación Oficial Ambiental ni con una tecnología de punta de bajas emisiones, por lo que la autocontaminación del mismo autobús tiene un papel importante en las concentraciones a las que están expuestos los usuarios que utilizan este tipo de transporte. Lo mencionado anteriormente, también se puede demostrar en el perfil de concentración de ese viaje, al momento de llegar a las estaciones finales y bajar del autobús las concentraciones disminuyen de aprox.  $100 \mu\text{g m}^{-3}$  a  $20 \mu\text{g m}^{-3}$ , situación que se puede observar al salir de ese autobús en la estación de Indios Verdes.

Además, se puede observar claramente que, en ambos horarios y viajes, los perfiles de concentración de  $\text{PM}_{2.5}$  muestran un comportamiento similar, iniciando en la parte del Sur de la CDMX con bajas concentraciones ambiente de  $\text{PM}_{2.5}$  ( $60 - 100 \mu\text{g m}^{-3}$ ) y terminando en la parte Norte de la CDMX con valores elevados de concentración ( $100 - 200 \mu\text{g m}^{-3}$ ). Al igual que lo observado en la Figura 16, en estos cuatro viajes existen picos de concentración en las mismas estaciones ya antes mencionadas y en otras nuevas estaciones que tienen registros de niveles máximos de  $\text{PM}_{2.5}$  en el periodo de análisis. Entre estas estaciones se encuentran las estaciones de: La Bombilla, Rio Churubusco, Félix Cuevas y Revolución, lo que ejemplifica aún más que las concentraciones de  $\text{PM}_{2.5}$  se incrementan cuando el autobús pasa por vialidades con alto flujo vehicular.

Al comparar los resultados de ambas Figuras (16 y 17) se observó que, los viajes de ida en un horario vespertino presentan concentraciones de  $\text{PM}_{2.5}$  más bajas en febrero ( $10 - 100 \mu\text{g m}^{-3}$ ) y fueron incrementándose a lo largo del periodo. Para el mes de abril, las concentraciones oscilaban entre  $60 - 180 \mu\text{g m}^{-3}$ . Los resultados anteriores nos muestran que los valores de concentración de  $\text{PM}_{2.5}$  se incrementan en la temporada seca caliente.

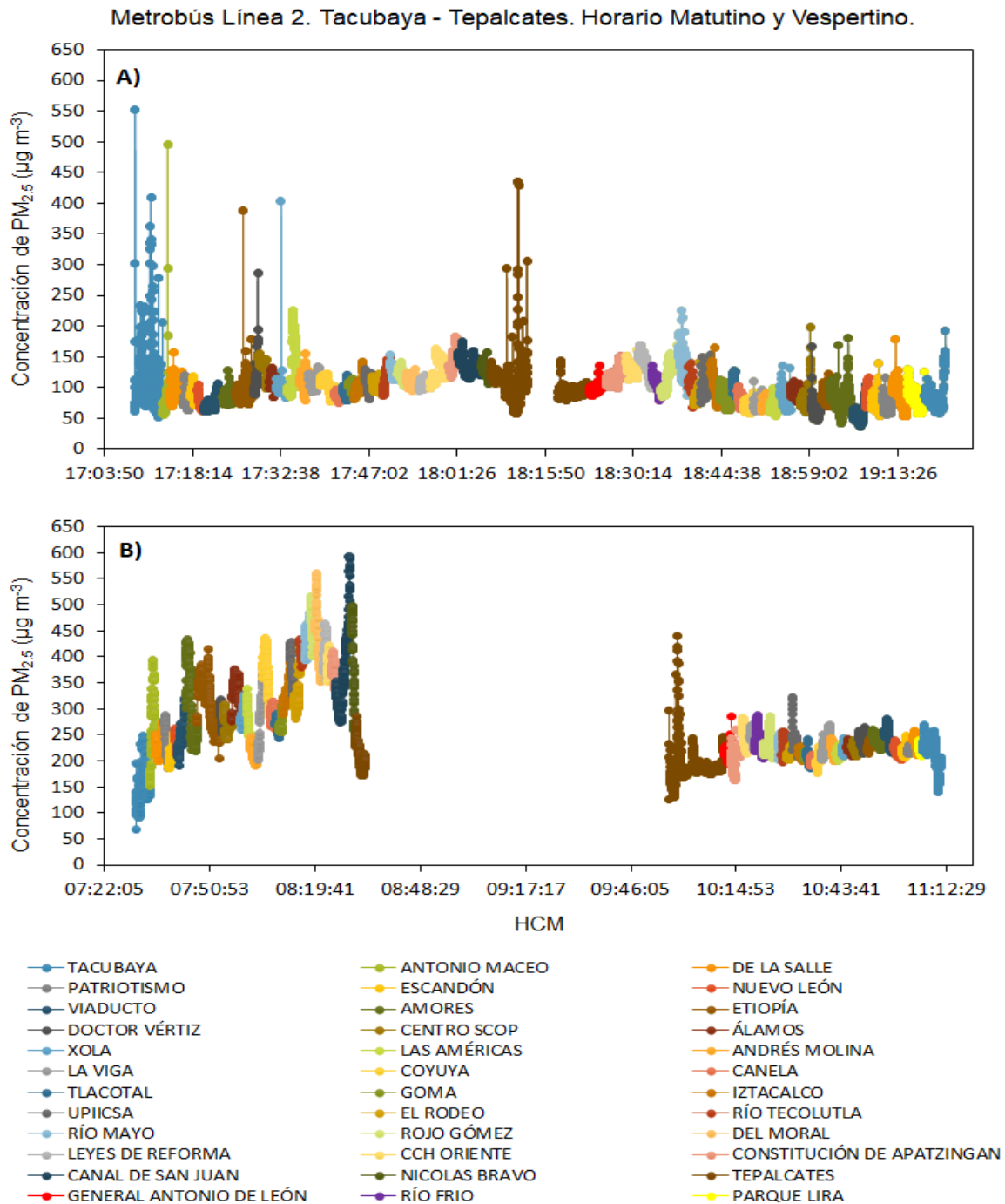
### 5.2.2 Series de tiempo de la línea 2 del Metrobús.

En esta sección se presentan los perfiles de concentración de  $PM_{2.5}$  más representativos, determinados a partir de los muestreos obtenidos durante las campañas de mediciones de la línea 2 del Metrobús, durante el periodo de muestreo 2017-2019. Dos trayectos fueron recorridos en esta línea: un primer trayecto (de ida) de Tacubaya a Tepalcates y un segundo trayecto (de vuelta) de Tepalcates a Tacubaya. En gran parte de los viajes realizados en esta línea, los camiones utilizados eran autobuses articulados Euro 3 y 5, los cuales se veían viejos, emitían grandes cantidades de humo por las salidas de los escapes y mantenían las ventanillas y escotillas abiertas.

La Figura 18 presenta las series de tiempo de las concentraciones ambiente de  $PM_{2.5}$  de dos viajes realizados en campañas de distinta temporada y en horarios diferentes. En ambos trayectos, las mayores concentraciones de  $PM_{2.5}$  se presentaron en los viajes de ida, en el viaje de ida de la mañana se registraron valores de concentración entre 100 y 500  $\mu g m^{-3}$ , con valores máximos y mínimos de concentración de 600  $\mu g m^{-3}$  y 80  $\mu g m^{-3}$ , mientras que en el viaje de ida de la tarde los valores de concentración se mantuvieron en un rango de 50 a 200  $\mu g m^{-3}$ , con concentraciones máximas y mínimas de 550  $\mu g m^{-3}$  y 50  $\mu g m^{-3}$ . Los resultados anteriores demuestran una vez más que existe mayor exposición a  $PM_{2.5}$  en los viajes realizados en el horario de la mañana en comparación con realizados en el horario de la tarde.

Por otro lado, también se puede observar claramente que los viajes de vuelta mantienen concentraciones de  $PM_{2.5}$  más bajas que las observadas en los viajes de ida. Se alcanzaron valores de concentración para los viajes de vuelta de 100 a 300  $\mu g m^{-3}$  para la mañana y de 30 a 175  $\mu g m^{-3}$  para la tarde. Además, se presentan pocos de picos de concentración, lo que indica que las concentraciones en estos viajes se mantienen casi constantes a lo largo de todo el recorrido, llegando a arrojar valores mínimos de concentración de hasta 25  $\mu g m^{-3}$  para el horario de la tarde. La disminución en estos valores de concentración se debe a que, durante los viajes de vuelta, las actividades matutinas de los ciudadanos y las horas pico de tráfico

disminuyen considerablemente, disminuyendo la circulación del transporte privado y la demanda de los usuarios a trasladarse de un lugar a otro.



**Figura 18.** Series de tiempo de las concentraciones ambiente de  $PM_{2.5}$  de dos viajes realizados en la línea 2 del Metrobús. A) Viaje completo de la tarde de la campaña 08-05-2019 y B) Viaje completo de la mañana de la campaña 31-10-2018.



En la Figura 18, también se puede observar claramente que, en ambos horarios y viajes, los perfiles de concentración de  $PM_{2.5}$  muestran un comportamiento similar, es decir, las concentraciones de  $PM_{2.5}$  van aumentando mientras nos acercamos a la zona oriente de la ciudad (estación Tepalcates) y decrecen mientras nos dirigimos hacia la zona poniente de la ciudad (estación Tacubaya). El aumento de concentraciones de  $PM_{2.5}$  durante el recorrido de una zona de la ciudad a otra, es debido a la gran afluencia vehicular de calzadas importantes con las que cruza la línea 2 del Metrobús. Una de ellas es el cruce con Viaducto Presidente Miguel Alemán, sin embargo, en los cruces con Circuito Interior y con la Av, Ignacio Zaragoza se registraron los cambios más notorios en los valores de concentración de  $PM_{2.5}$ , ya que la circulación y el congestionamiento vehicular en estas zonas es mayor, sobre todo en el horario de la mañana.

Los valores de concentración de  $PM_{2.5}$  observados en estas zonas coinciden con los picos de concentración en varias estaciones que se encuentran cercanas a estas vialidades y en las cuales hay transbordos de estación. Entre estas estaciones se encuentran: Antonio Maceo, De la Salle, Viaducto, Amores, Etiopia, La viga, Coyuya, Iztacalco, Rojo Gómez, Constitución de Apatzingán, Canal de San Juan, y Tepalcates.

De lo reportado en otros estudios sobre exposición personal a  $PM_{2.5}$  en el transporte colectivo Metro y Metrobús, se observó que la ruta con mayores niveles de exposición a  $PM_{2.5}$  es la línea 2 del Metrobús, con un promedio general de  $PM_{2.5}$  ( $\mu g\ m^{-3}$ ) de hasta 5 veces mayor que el resto de las líneas y modos de transporte utilizados (Cano, 2019). Siendo tentativamente, el contacto con el parque vehicular y una flotilla de autobuses vieja con deficiencias de tecnología, los motivos principales de los valores de concentración de  $PM_{2.5}$  más elevados en esta línea, ya que el equipo de monitoreo registraba tanto las partículas  $PM_{2.5}$  provenientes de la quema de combustible de los vehículos que circulaban en zonas aledañas como las partículas emitidas por las condiciones del mismo autobús (auto contaminación).

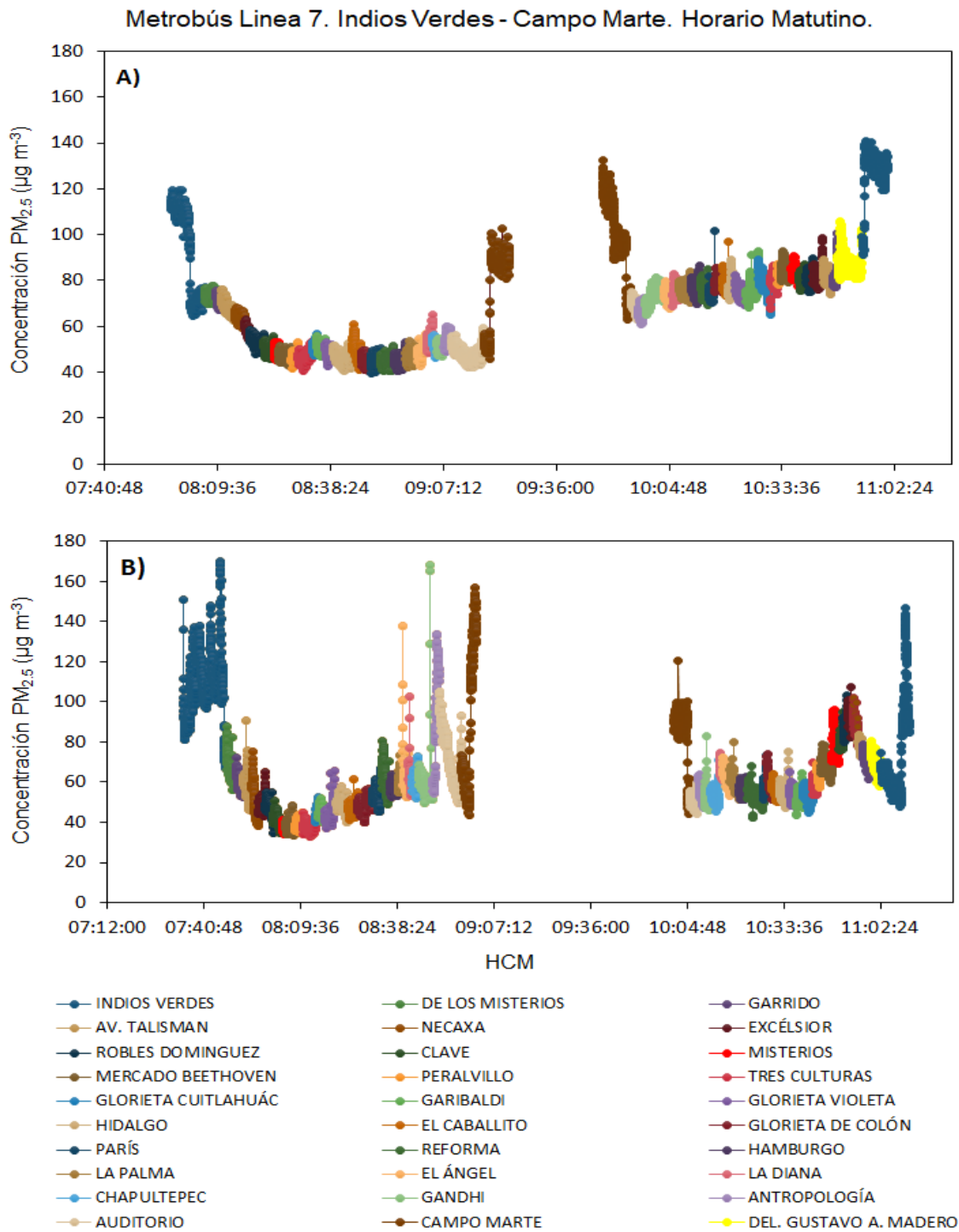
### 5.2.3 Series de tiempo de la línea 7 del Metrobús.

En esta última sección de series de tiempo, se presentan los perfiles de concentración de  $PM_{2.5}$  más representativos durante el periodo de muestreo 2017-2019, obtenidos de los muestreos de línea 7 del Metrobús. Los trayectos recorridos en esta línea fueron dos: un primer trayecto (de ida) de Indios Verdes a Campo Marte y un segundo trayecto (de vuelta) de Campo Marte a Indios Verdes. En todos los viajes realizados en esta línea se utilizaron autobuses de doble piso, que son camiones panorámicos y completamente sellados, y que cuentan con una Certificación Oficial Ambiental Euro VI.

La Figura 19 muestra los niveles de concentración ambiente de  $PM_{2.5}$  de dos viajes de ida realizados en el horario de la mañana y en dos temporadas diferentes (seca caliente y seca fría). Se puede observar que en ambos viajes las concentraciones se mantienen casi constantes a lo largo de los trayectos en comparación con las otras líneas monitoreadas del Metrobús (línea 1 y 2) y no hay grandes picos de concentración, a pesar de ser el horario de la mañana, sin embargo, existe una mayor fluctuación en los valores de concentración de  $PM_{2.5}$  para la temporada seca fría que para la temporada seca caliente. Para el viaje de la temporada seca caliente (23-05-2018), los valores de concentración de  $PM_{2.5}$  se mantuvieron entre 35 y 75  $\mu g m^{-3}$  para el viaje de ida y entre 60 y 90  $\mu g m^{-3}$  para el viaje de vuelta. Para la temporada seca fría (07-11-2018) los valores de concentración se incrementaron a 35 y 85  $\mu g m^{-3}$  para el primer viaje, mientras que, para el segundo viaje aumentaron a 45 y 100  $\mu g m^{-3}$ .

En esta línea, las concentraciones máximas de  $PM_{2.5}$  alcanzadas corresponden a los niveles de exposición personal fuera de los microambientes de trabajo. Lo anterior se puede observar de manera clara en las estaciones finales de los recorridos (Campo Marte e Indios verdes), en las cuales las concentraciones de  $PM_{2.5}$  se incrementan al salir del camión y disminuyen al entrar al mismo. De esta manera, los puntos extremos de los trayectos son lugares con concentraciones más elevadas, al igual que algunas estaciones intermedias, entre estas estaciones:

Necaxa, Excelsior, De Los Misterios, Glorieta Violeta, Hidalgo, El caballito, Reforma, El Ángel, Antropología y Misterios.



**Figura 19.** Series de tiempo de las concentraciones ambiente de  $PM_{2.5}$  de dos viajes realizados en la línea 7 del Metrobús. A) Viaje completo de la mañana de la campaña 23-05-2018 y B) Viaje completo de la tarde de la campaña 07-11-2018.

De manera general, las concentraciones de  $PM_{2.5}$  tienen el siguiente comportamiento: se mantienen elevadas en Indios Verdes y van disminuyendo conforme nos acercamos a Garibaldi, posteriormente vuelven a elevarse al pasar por Paseo de la Reforma y llegar hasta a Campo Marte. Se puede decir, que los usuarios presentan una mayor exposición a  $PM_{2.5}$  cuando se dirigen de la zona Norponiente (Campo Marte) a la zona Norte (Indios Verdes) de la ciudad, ya que en estos puntos se tienen concentraciones máximas de hasta  $140 - 160 \mu g m^{-3}$ .

Parte de las bajas concentraciones de  $PM_{2.5}$  que se registraron en esta línea se deben al tipo de autobús utilizado. Según lo registrado en la Tabla 5, en esta ruta se manejan autobuses de doble piso (Enviro 500), autobuses que cuentan con una tecnología en su motor que cumple con las normas más estrictas establecidas en Europa y Estados Unidos (EURO VI y EPA16/17 respectivamente). Este tipo de autobuses se encuentran totalmente sellados, no tiene ventanas ni escotillas, lo que impide la entrada y el intercambio de partículas  $PM_{2.5}$  con el ambiente exterior. También poseen un sistema de climatización en ambos pisos. El filtro de aire acondicionado en recirculación actúa reteniendo gran parte de las partículas  $PM_{2.5}$ , generando un ambiente más limpio para los usuarios y con menor riesgo a la exposición personal de partículas  $PM_{2.5}$ .

### **5.3 Análisis estadísticos de las series de tiempo.**

Para analizar las series de tiempo de las campañas de muestreo, se realizó un análisis exploratorio de las concentraciones ambiente de  $PM_{2.5}$  en el período muestreado. Para ello se elaboraron diagramas de caja y bigotes, en los que se ilustraron los cuatro estadísticos: media, mediana, percentil 25, percentil 75 y las concentraciones máximas y mínimas (no se consideraron los datos atípicos). Estos métodos estandarizados nos permitieron representar gráficamente las series de datos de las concentraciones de  $PM_{2.5}$  de cada línea monitoreada del Metrobús y nos ayudaron a visualizar de mejor manera el comportamiento de estos datos recabados en cada campaña. En la siguiente sección se presentan los diagramas

de caja y bigotes de los análisis estadísticos de las concentraciones de  $PM_{2.5}$  de las líneas 1, 2 y 7 del Metrobús.

### **5.3.1 Análisis estadístico de la línea 1 del Metrobús.**

La Figura 20 muestra las variaciones de las concentraciones de exposición a  $PM_{2.5}$  en la línea 1 del Metrobús a lo largo del período de muestreo 2017-2019. Se puede observar grandes diferencias entre las concentraciones de  $PM_{2.5}$  de los dos horarios. Durante las mediciones en el horario de la mañana, las concentraciones de  $PM_{2.5}$  fueron más altas que durante las mediciones en el horario de la tarde. Sin embargo, estas concentraciones de  $PM_{2.5}$  fueron similares en varios de los días monitoreados, específicamente en los días intermedios de todo el periodo de muestreo.

Los días que mostraron poca variación en las concentraciones promedio de  $PM_{2.5}$  fueron los días 18/04/2018, 24/10/2018, 11/02/2019, 15/02/2019 y 19/02/2019. Se registraron concentraciones promedio en el horario de la mañana de 85.36, 75.93, 89.69, 112.93 y 108.08  $\mu\text{g m}^{-3}$ , respectivamente. Del mismo modo, las medianas registradas en estos días tuvieron poca variación, pero no ocurrió lo mismo con la dispersión de las mediciones, siendo el mes de febrero uno de los meses con mayor dispersión en las mediciones, con valores de 6.91 a 230.52  $\mu\text{g m}^{-3}$ . Para el horario de la tarde, las dispersiones en las mediciones fueron más bajas al igual que las concentraciones de  $PM_{2.5}$ , llegando a tener dispersiones de mediciones, por ejemplo, el día 19/02/2019 de un rango de 9.21 – 70.00  $\mu\text{g m}^{-3}$  y registrando una concentración promedio de  $PM_{2.5}$  de 39.01  $\mu\text{g m}^{-3}$ .

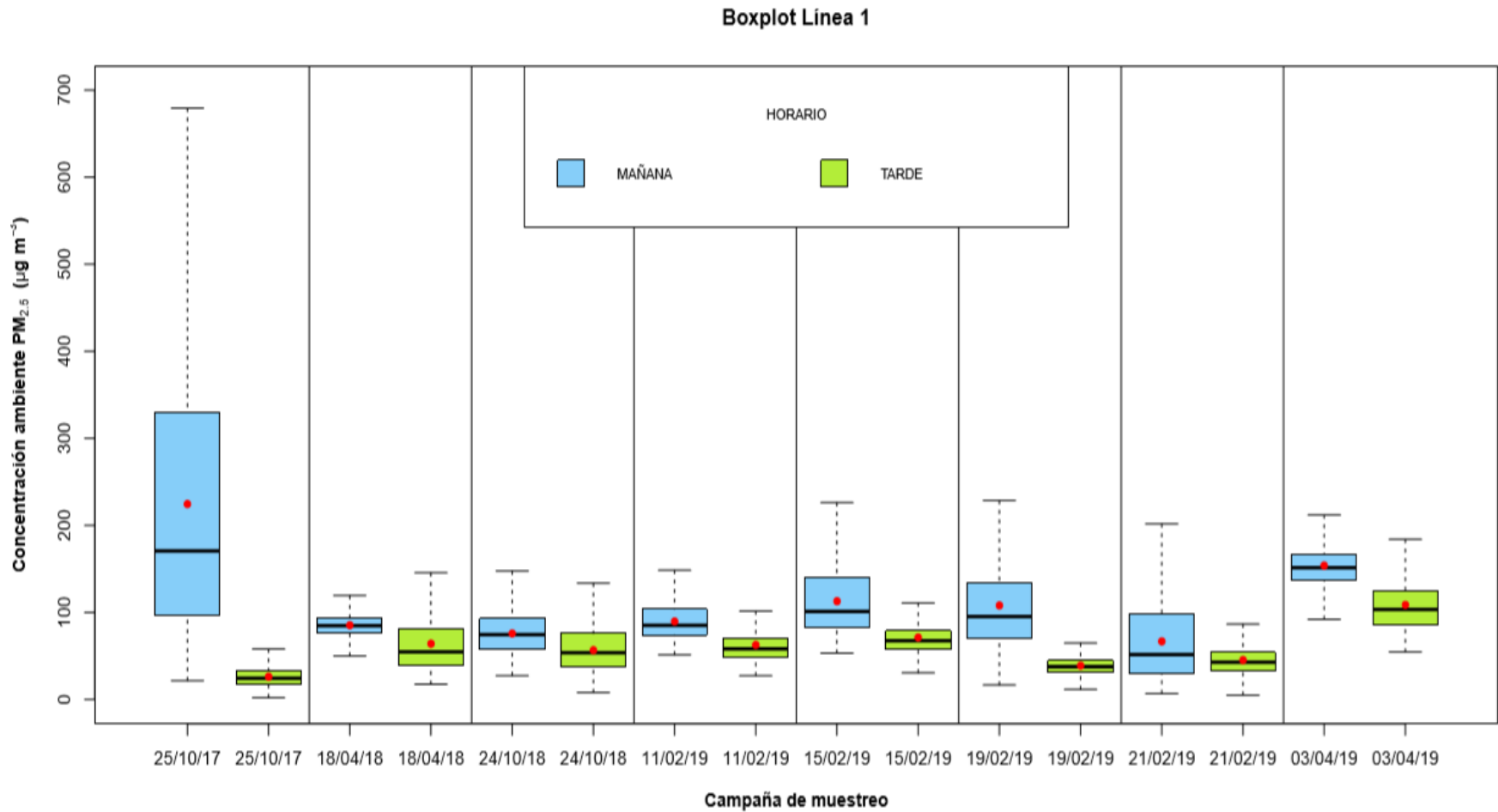
Se puede observar de manera paralela que el día 03/04/19 mostró las concentraciones de  $PM_{2.5}$  más elevadas de todo el periodo del muestreo en ambos horarios (sin tomar en cuenta el primer día de muestreo), en la mañana y en la tarde, se detectaron concentraciones promedio de  $PM_{2.5}$  de 153.90 y 108.73  $\mu\text{g m}^{-3}$ , con una dispersión de mediciones de 58.02 - 220.52  $\mu\text{g m}^{-3}$  para el horario matutino y una de 54.50 – 190.30  $\mu\text{g m}^{-3}$  para el horario de la tarde. Según lo registrado en bitácoras, este día registró concentraciones de  $PM_{2.5}$  más elevadas que las

registradas en los otros días de monitoreo porque días previos a este monitoreo se activó el protocolo de contingencia ambiental en la Ciudad de México debido a la alta concentración de contaminantes, lo que pudo haber afectado las mediciones de ese día e incrementando las lecturas en las concentraciones de  $PM_{2.5}$ .

Es importante mencionar que según lo mostrado en la Tabla 5 y 6, en todas las campañas de monitoreo de esta línea, excepto en la campaña del 25/10/2017 se utilizaron autobuses de bajas emisiones con tecnología Euro 5, mientras que en el viaje de la mañana de la campaña del mes de octubre de 2017 se utilizó un camión marca Volvo B2M con tecnología Euro 3, de ahí que el viaje realizado ese día por la mañana mostrara concentraciones de  $PM_{2.5}$  sumamente elevadas.

En este viaje se registró una concentración promedio de  $224.52 \mu\text{g m}^{-3}$ , con una alta dispersión de mediciones en las concentraciones de  $PM_{2.5}$  que van de  $21.68$  a  $690.30 \mu\text{g m}^{-3}$ , el 50% de las concentraciones medidas se encontraron por encima de  $170.53 \mu\text{g m}^{-3}$ , superando los valores de las concentraciones medias de  $PM_{2.5}$  de los otros días del periodo de muestreo. Mientras que, en el viaje de la tarde, las concentraciones disminuyeron de manera significativa, llegando a registrar valores de concentración promedio de  $PM_{2.5}$  de  $26.30 \mu\text{g m}^{-3}$  y mostrando una baja dispersión de datos ( $2.20 - 56.64 \mu\text{g m}^{-3}$ ).

Esta última comparación nos muestra un claro ejemplo de que las condiciones y tecnologías del autobús utilizado durante los recorridos afectan de manera directa los valores de las concentraciones de  $PM_{2.5}$ , es decir, la auto contaminación del propio autobús contribuye de manera importante en obtener valores elevados de los niveles de exposición personal a  $PM_{2.5}$  dentro del autobús. Aunque no es el único factor que influye en la exposición personal a la contaminación del aire. Las concentraciones de  $PM_{2.5}$  en estos viajes monitoreados pueden llegar a cambiar debido a las condiciones climáticas (temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, etc.), la ubicación geográfica y la hora del día, entre otros.



**Figura 20.** Diagrama de caja y bigotes de las concentraciones ambiente de PM<sub>2.5</sub> observadas en las campañas de muestreo de la línea 1 del Metrobús. La línea horizontal (–) muestra la mediana, la marca roja (♦) la media aritmética, los extremos de la caja (□) los percentiles 25 y 75 y los extremos de los bigotes (|) los valores máximos y mínimos.

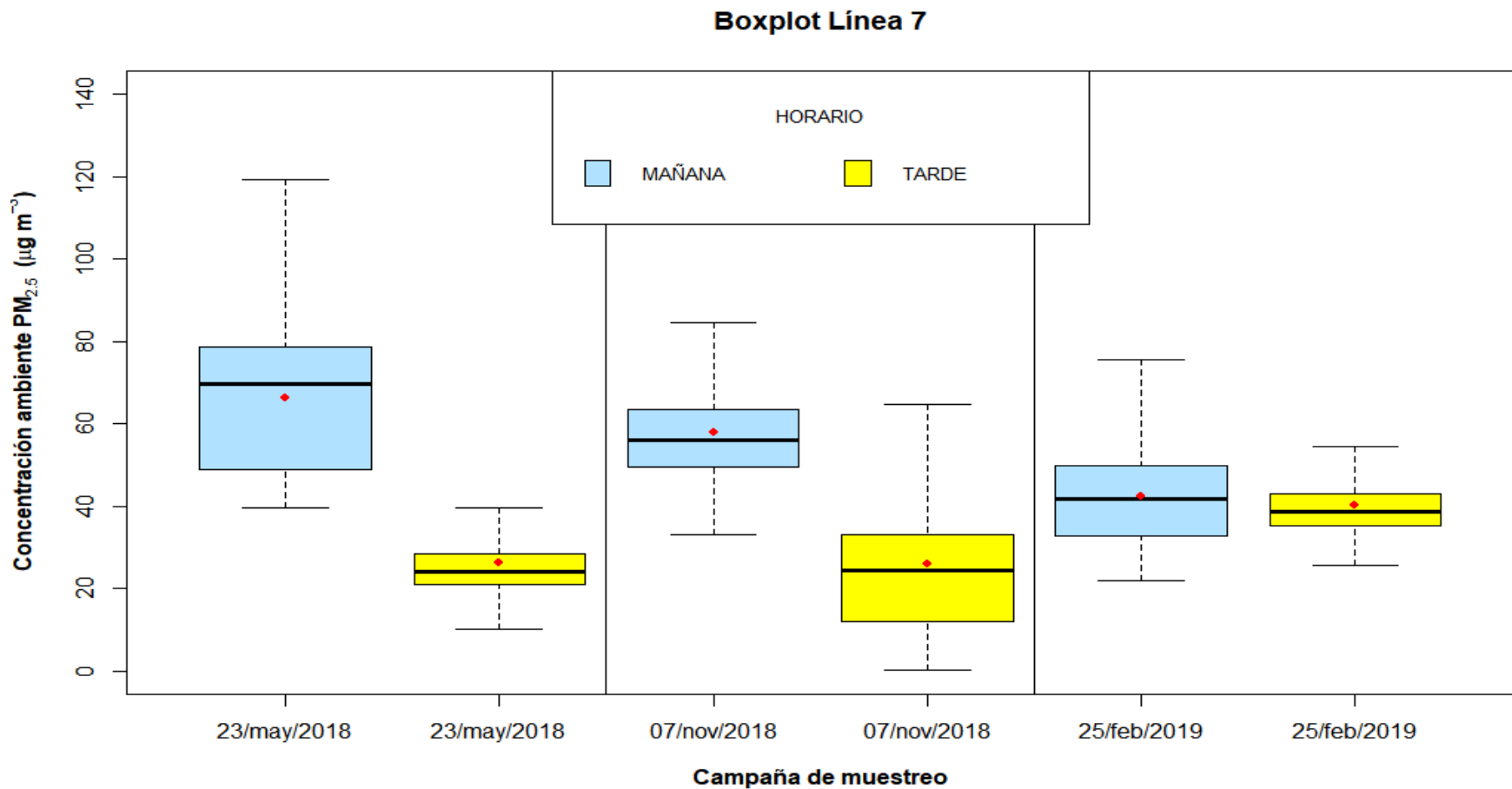
### 5.3.2 Análisis estadístico de la línea 7 del Metrobús.

En el diagrama de caja y bigotes de la línea 7 del Metrobús, se puede observar que las mediciones de  $PM_{2.5}$  son más dispersas por la mañana en comparación con la tarde. Al analizar las concentraciones diarias de  $PM_{2.5}$  en el horario de la mañana, se observa un comportamiento decreciente a lo largo del período de muestreo, registrándose los niveles de  $PM_{2.5}$  más altos en mayo de 2018 y los más bajos en febrero de 2019. Sin embargo, para el horario de la tarde, las concentraciones de  $PM_{2.5}$  no siguieron el mismo patrón de comportamiento que en la mañana y las concentraciones fueron incrementando gradualmente mientras nos acercábamos al final del periodo del muestreo, registrándose concentraciones de  $PM_{2.5}$  más elevadas en febrero de 2019 y más bajas en mayo de 2018.

La mayor concentración promedio de  $PM_{2.5}$  se registró en el viaje de la mañana del mes de mayo, con un valor de  $66.12 \mu\text{g m}^{-3}$ , siendo aproximadamente 2.5 veces mayor que la concentración promedio observada ese mismo día por la tarde, con valor de  $26.32 \mu\text{g m}^{-3}$ . Este día también registró una concentración máxima de  $120.34 \mu\text{g m}^{-3}$  y una concentración mínima de  $39.52 \mu\text{g m}^{-3}$ , siendo un rango de mediciones altamente dispersas. Sin embargo, la concentración promedio de  $PM_{2.5}$  más baja ( $25.93 \mu\text{g m}^{-3}$ ) se registró en el viaje de la tarde del mes de noviembre, llegando a obtener valores mínimos de concentración de hasta  $2.34 \mu\text{g m}^{-3}$ . Del mismo modo, las tardes del 23 de mayo y 25 de febrero tuvieron las mediciones menos dispersas ( $9.10 - 40.10 \mu\text{g m}^{-3}$  y  $25.60 - 54.94 \mu\text{g m}^{-3}$ ).

En la Figura 21, se pudo observar que, en todas las campañas de muestreo realizadas en la línea 7 del Metrobús, el 75% de las concentraciones ambiente de  $PM_{2.5}$  registradas en el horario de la mañana, se encuentran por debajo de los  $80 \mu\text{g m}^{-3}$ . Mientras que, en el horario de la tarde, el 50 % de las concentraciones de  $PM_{2.5}$  medidas no rebasan los  $38.59 \mu\text{g m}^{-3}$ . También, se observó que, en la mayoría de los viajes muestreados excepto en el viaje de la mañana del mes de mayo de 2018, la media aritmética se encuentra por encima de la mediana lo que indica que la distribución de las concentraciones de  $PM_{2.5}$  es asimétrica con un sesgo hacia valores más pequeños de concentración.





**Figura 21.** Diagrama de caja y bigotes de las concentraciones ambiente de  $PM_{2.5}$  observadas en las campañas de muestreo de la línea 7 del Metrobús. La línea horizontal (—) muestra la mediana, la marca roja (♦) la media aritmética, los extremos de la caja (□) los percentiles 25 y 75 y los extremos de los bigotes (|) los valores máximos y mínimos.

De lo registrado en la Tabla 5, se puede observar que en todos los viajes realizados en la línea 7 se utilizó el mismo autobús (Enviro 500 2017, con tecnología de bajas emisiones Euro 6), autobús que cuentan con filtros de aire acondicionado que actúan reteniendo gran parte de las partículas  $PM_{2.5}$ . También este tipo de autobuses cumplen con estándares internacionales, especificaciones operacionales y medioambientales respecto a otras unidades que hoy transitan en otras avenidas.

El motor del autobús Enviro 500 cuenta con un sistema DPF, el cual es un dispositivo conectado al sistema de escape y diseñado para eliminar las partículas de hollín de los gases de escape de un motor diésel, actuando como trampa para atrapar a más del 99.5 % de las partículas sólidas en suspensión que hay en los gases de escape (ICCT, 2017). Debido a toda esta tecnología con la cuenta dicha unidad, la auto contaminación en este tipo de transporte es considerablemente menor en comparación con modelos más viejos utilizados en otras líneas del Metrobús.

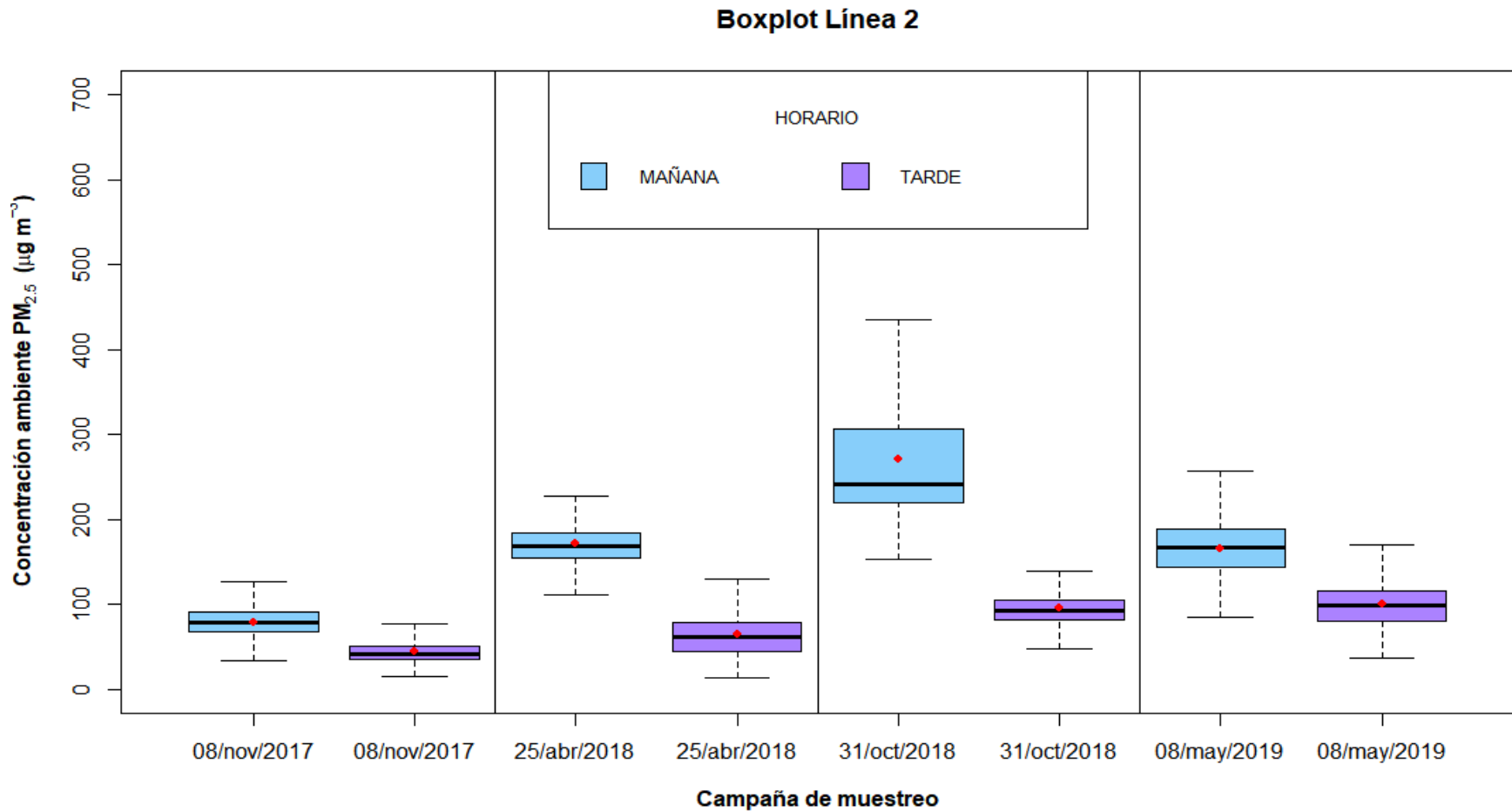
Como evidencia de lo anterior, el perfil de concentración de esta línea mostró concentraciones de  $PM_{2.5}$  más altas en el entorno exterior que en el interior de los autobuses. Por lo que, se puede inferir que, en el muestreo de los viajes realizados en la línea 7, la auto contaminación del autobús no parece ser un factor importante en los valores de concentración de  $PM_{2.5}$  y que los desplazamientos en autobuses con mejores tecnologías pueden proteger a los viajeros de un aumento en la exposición de concentraciones de  $PM_{2.5}$ .

### 5.3.3 Análisis estadístico de la línea 2 del Metrobús.

La Figura 22 muestra las concentraciones de  $PM_{2.5}$  medidas en la línea 2 del Metrobús durante el periodo de muestreo 2017-2019. Se puede observar nuevamente que las concentraciones de  $PM_{2.5}$  fueron más altas durante las mediciones diurnas que durante las nocturnas. Sin embargo, en esta línea se registraron las concentraciones de  $PM_{2.5}$  más altas de todo el periodo de muestreo. También, se observó que, en todos los viajes excepto en el viaje de la mañana del mes de octubre de 2018, los estadísticos de tendencia central (media aritmética y mediana) se encuentran muy cercanos al centro de la caja, lo que indica una distribución simétrica de las concentraciones de  $PM_{2.5}$ .

Se puede observar que el día que hubo una mayor exposición a  $PM_{2.5}$  fue el día 31/oct/2018. En el viaje de la mañana se registró una concentración promedio de  $271.50 \mu\text{g m}^{-3}$  y una mediana de  $241.80 \mu\text{g m}^{-3}$ . La mayoría de las concentraciones medidas en la mañana se mantuvieron en un rango de  $219.70 - 306.20 \mu\text{g m}^{-3}$  y se tuvieron concentraciones máximas de hasta  $440.20 \mu\text{g m}^{-3}$  y mínimas de hasta  $152.60 \mu\text{g m}^{-3}$ . Por la tarde, la dispersión de mediciones fue bastante menor (rango de  $47.06 - 141.81 \mu\text{g m}^{-3}$ ), con una concentración promedio de  $PM_{2.5}$  de  $95.44 \mu\text{g m}^{-3}$  y una mediana de  $92.39 \mu\text{g m}^{-3}$ . Por otro lado, el día que mostro la menor concentración fue el día 08/Nov/2017. En el viaje de la mañana se registró una concentración promedio de  $PM_{2.5}$  de  $78.43 \mu\text{g m}^{-3}$  y una menor dispersión con mediciones que van de  $22.26$  a  $136.50 \mu\text{g m}^{-3}$ . Para el horario de la tarde, la concentración promedio de  $PM_{2.5}$  fue de  $44.81 \mu\text{g m}^{-3}$  y se llegaron a tener concentraciones mínimas de hasta  $14.66 \mu\text{g m}^{-3}$ . Las concentraciones medias de  $PM_{2.5}$  en el mes de octubre de 2018 y el mes de mayo de 2019 fueron muy similares con una diferencia de solo  $6.18 \mu\text{g m}^{-3}$ .

La mayor inhalación de  $PM_{2.5}$  a bordo de los autobuses de las líneas 1 y 2, probablemente se debió a la recirculación de las emisiones de escape dentro de la cabina debido a las ventanillas y escotillas abiertas. Resultados que no coinciden con los encontrados en la línea 7, donde los autobuses a menudo circulan con aire acondicionado, y son camiones completamente sellados.



**Figura 22.** Diagrama de caja y bigotes de las concentraciones ambiente de  $PM_{2.5}$  observadas en las campañas de muestreo de la línea 2 del Metrobús. La línea horizontal (-) muestra la mediana, la marca roja (♦) la media aritmética, los extremos de la caja (□) los percentiles 25 y 75 y los extremos de los bigotes (|) los valores máximos y mínimos.

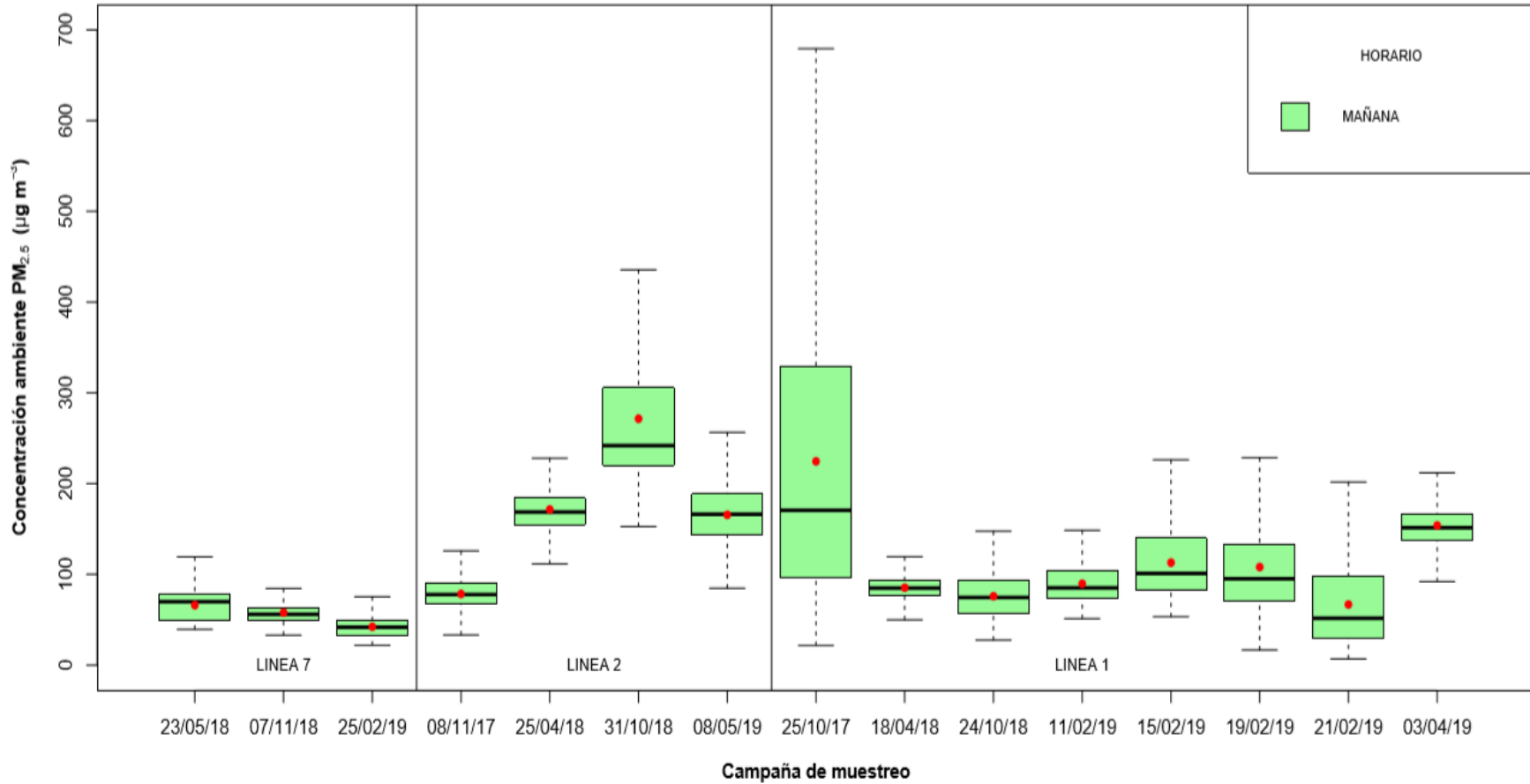
#### **5.3.4 Análisis estadístico de las líneas 1,2 y 7 del Metrobús en el horario de la mañana.**

En la Figura 23, se muestra el diagrama de caja y bigotes obtenido de las concentraciones ambiente de  $PM_{2.5}$  de los viajes realizados en el horario de la mañana en todas las líneas del Metrobús monitoreadas. Como se ha venido observando en los diagramas anteriores, las concentraciones ambientes de  $PM_{2.5}$  son más elevadas en el horario de la mañana, lo que indica que el ciclo diurno de la fracción respirable  $PM_{2.5}$  se ve más afectado por las actividades cotidianas de las personas, por variables meteorológicas y por la contribución de fuentes de emisión de contaminantes como, por ejemplo, la suspensión de polvos de construcciones aledañas, incluyendo la pavimentación de calle y por las emisiones primarias de los escapes de los vehículos que circulan de manera paralela a las vías del Metrobús y las mismas emisiones generadas por el propio autobús (auto contaminación).

De acuerdo al análisis estadístico mostrado, se observa que, la línea que mostró la mayor exposición a  $PM_{2.5}$  en el horario de la mañana fue la línea 2, seguido de la línea de 1 y por último la línea 7 (hecho que se demuestra con el desplazamiento de las cajas y los bigotes de la misma). Estas diferencias significativas en las concentraciones de  $PM_{2.5}$  de los viajes realizados en las líneas del Metrobús, se pudo deber a los efectos del tráfico presentado en cada ruta, el autobús utilizado y las condiciones del viaje, ya que en las líneas 1 y 2 solo hay disponibilidad de autobuses (Euro 3 y 5) biarticulados y articulados de modelos viejos (marca VOLVO y DINA). Además, en la mayoría de los recorridos realizados en estas dos líneas, los autobuses mantuvieron ventanillas y escotillas abiertas, lo que permite el intercambio de partículas  $PM_{2.5}$  con el ambiente exterior provocando variaciones en la dispersión de mediciones y en las concentraciones registradas en cada viaje.

En los recorridos de la mañana de la línea 2, se puede observar que las medianas en estos viajes son diferentes al igual que las dispersiones en las mediciones realizadas, lo cual no sucede con las concentraciones medias de los viajes realizados en las líneas 1 y 7 en la que las medianas son similares y las dispersiones en los valores de concentración de  $PM_{2.5}$  son más constantes entre cada viaje.

Boxplot de todas las líneas en la mañana



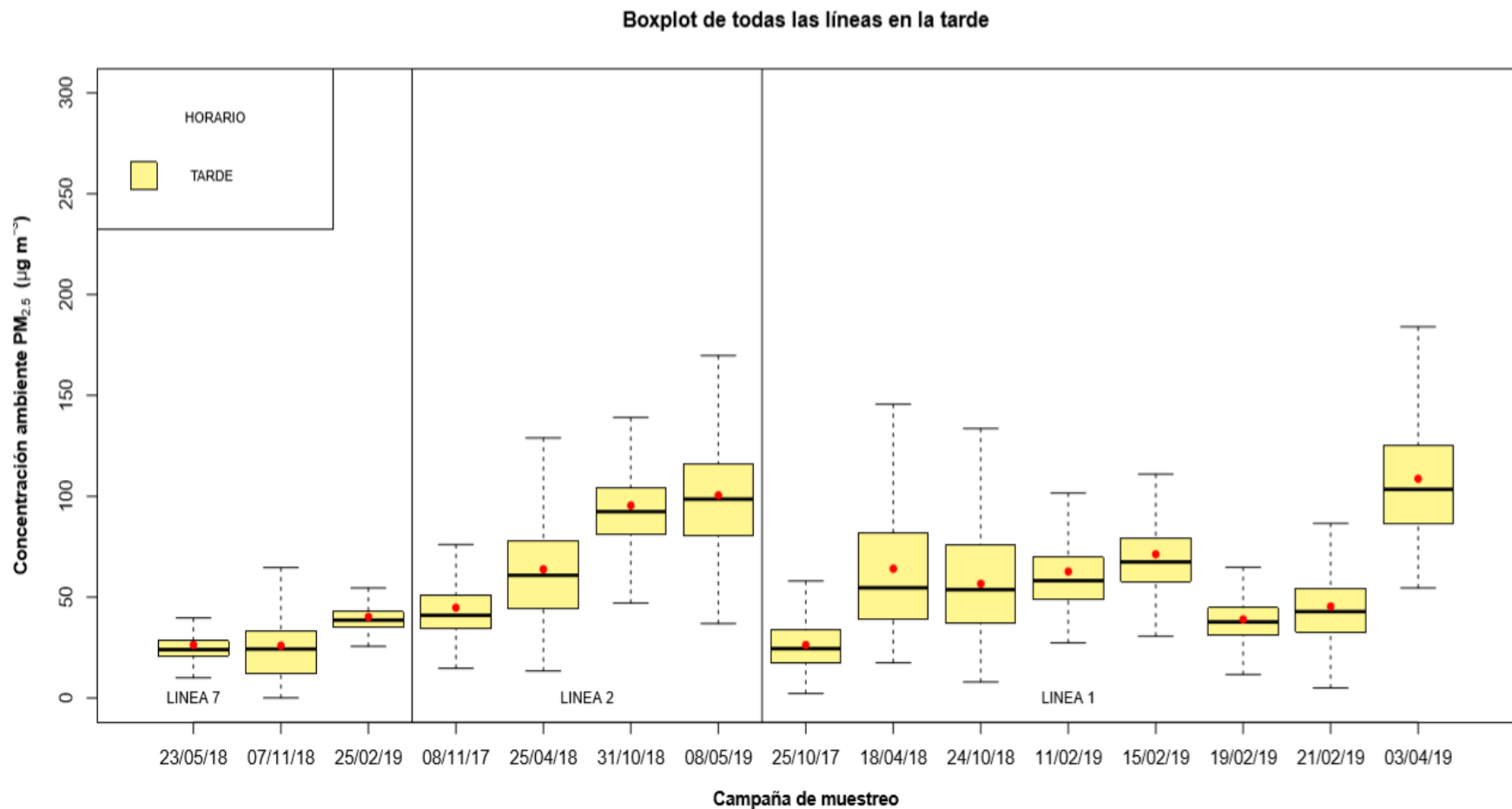
**Figura 23.** Diagrama de caja y bigotes de las concentraciones ambiente de PM<sub>2.5</sub> observadas en las campañas de muestreo de las líneas 1,2 y 7 del Metrobús en el horario de la mañana. La línea horizontal (-) muestra la mediana, la marca roja (♦) la media aritmética, los extremos de la caja (□) los percentiles 25 y 75 y los extremos de los bigotes (|) los valores máximos y mínimo

### **5.3.5 Análisis estadístico de las líneas 1, 2 y 7 del Metrobús en el horario de la tarde.**

En la Figura 24, se presentan los niveles de concentración de  $PM_{2.5}$  obtenidos en todos los viajes realizados en el horario de la tarde de las diferentes líneas monitoreadas del Metrobús. En términos generales, existen un mejor comportamiento de las concentraciones de  $PM_{2.5}$  por la tarde, no hay grandes fluctuaciones o contribuciones por parte de las partículas de fracción respirable. Se observa cómo para cada una de las líneas monitoreadas las concentraciones van incrementándose a lo largo de todo el periodo de muestreo, mostrando una menor exposición a  $PM_{2.5}$  en los primeros años de monitoreo (2017-2018) y terminando con mayores niveles de exposición personal a  $PM_{2.5}$  en los últimos años de muestreo (2019).

Del análisis estadístico mostrado en el diagrama de caja y bigotes se observa que la línea 7 tuvo una menor dispersión en las mediciones de las concentraciones de  $PM_{2.5}$  ( $2.01 - 54.63 \mu\text{g m}^{-3}$ ) comparada con las dispersiones de las líneas 1 y 2 ( $3.20 - 190.30 \mu\text{g m}^{-3}$  y  $13.38 - 176.02 \mu\text{g m}^{-3}$ ). Estas últimas dos líneas comparadas con la línea 7, son las rutas con menor control de emisiones en cuanto al tipo de autobús utilizado, al tránsito de vehículos pesado en zonas aledañas y a las condiciones de viajes, y fueron las que presentaron las concentraciones de  $PM_{2.5}$  más elevadas, específicamente los días 08/05/2019 y 03/04/2019, que son días de monitoreo pertenecientes a la temporada seca caliente. Para estos días las concentraciones promedio de  $PM_{2.5}$  fueron de ( $100.46 \mu\text{g m}^{-3}$ ) y ( $108.43 \mu\text{g m}^{-3}$ ), respectivamente.

Lo resultados anteriores coincidieron con los observados en el horario de la mañana, en los cuales, los días de temporada seca caliente mostraron niveles de concentración  $PM_{2.5}$  cercanos e inclusive un poco más elevados a los viajes realizados en los días de temporada seca fría a excepción de algunos viajes realizados en autobuses con tecnología deficiente o de los cuales no se tiene registro como es el caso de los días 31/10/2018 y 25/10/2017.



**Figura 24.** Diagrama de caja y bigotes de las concentraciones ambiente de PM<sub>2.5</sub> observadas en las campañas de muestreo de las líneas 1,2 y 7 del Metrobús en el horario de la tarde. La línea horizontal (–) muestra la mediana, la marca roja (♦) la media aritmética, los extremos de la caja (□) los percentiles 25 y 75 y los extremos de los bigotes (|) los valores máximos y mínimos.



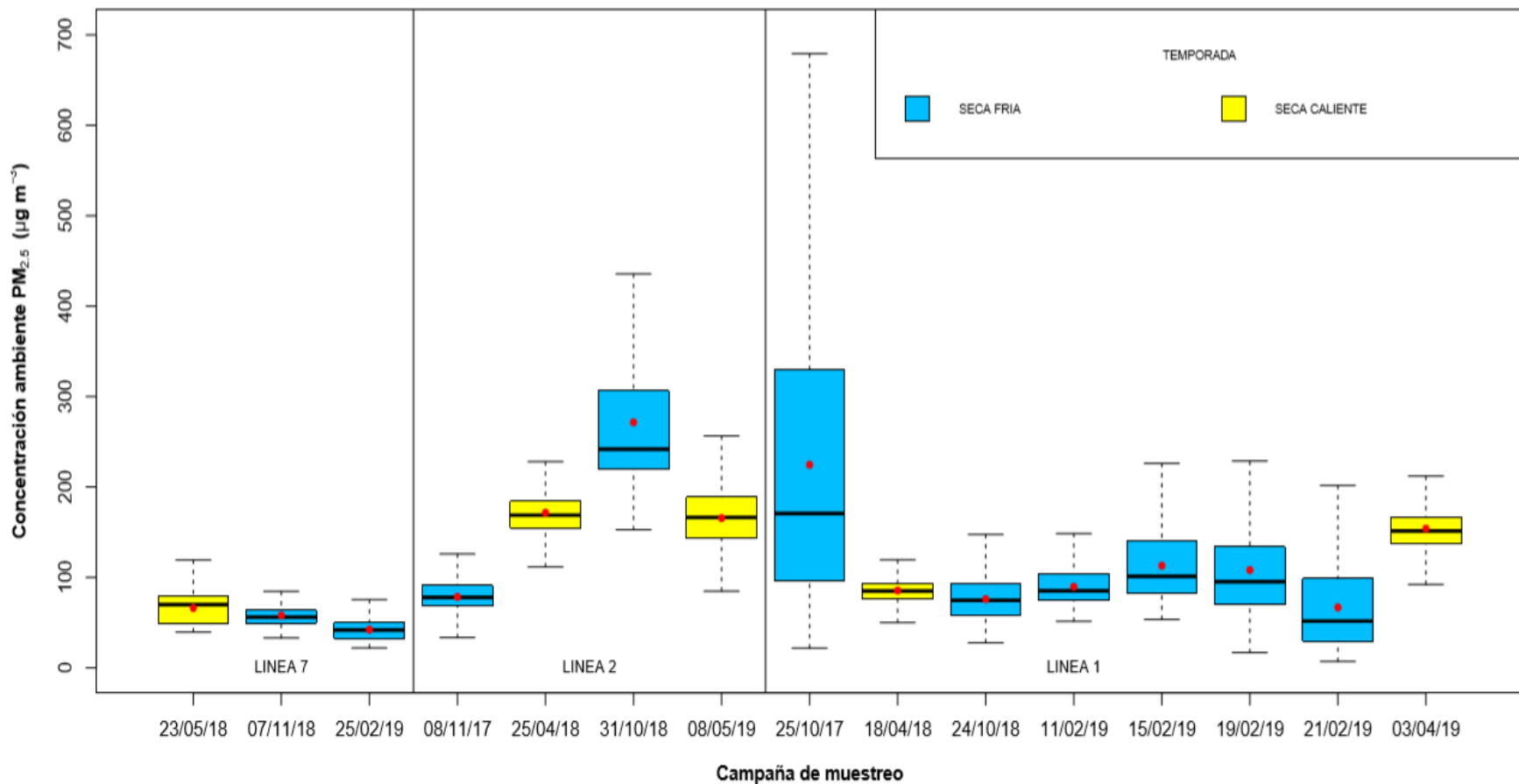
### **5.3.6 Análisis estadístico de las líneas 1,2 y 7 del Metrobús en la temporada seca fría y seca caliente.**

En las Figuras 25 y 26, se presentan las concentraciones ambiente de  $PM_{2.5}$  obtenidas en las líneas 1,2 y 7 del Metrobús en dos temporadas del año (temporada seca caliente y seca fría). Se observó que en los dos periodos de muestreo la contribución de  $PM_{2.5}$  fue mayor durante la temporada seca caliente y menor durante la temporada seca fría (principalmente para el horario vespertino). Lo anterior se puede deber a la formación de aerosoles secundarios durante parte del día ya que los componentes de las partículas, como el hollín (carbono negro), pueden absorber la radiación solar y contribuir de esta forma al calentamiento de la atmósfera.

Estas variables meteorológicas como la fuerte insolación y las altas temperaturas de la atmósfera hacen que los niveles de inmisión máximos de este contaminante secundario se den, fundamentalmente, en los meses de verano, de aquí que la mayor concentración de  $PM_{2.5}$  se registrara en la temporada seca caliente. Este efecto se ve reflejado sobre todo en las líneas 1 y 2, donde se observa un claro incremento en las concentraciones de  $PM_{2.5}$  hacia la época caliente, principalmente en el horario de la tarde, que es el horario en el que se muestra una mayor exposición a temperaturas altas y en consecuencia una humedad menor.

Por otra parte, otro factor meteorológico que puede llegar a afectar los niveles de concentración de  $PM_{2.5}$  en gran parte de la mañana y sobre todo en la temporada seca caliente, es la capa de mezclado, un fenómeno que ocurre diariamente en la atmósfera debido a la turbulencia en el cual se lleva a cabo el proceso de mezclado de contaminantes emitidos en todo el día. El ascenso de la capa de mezclado comienza aproximadamente a las 9:00 de la mañana, alcanzando su máximo a las 15:00 horas y conforme pasa el tiempo, la capa de mezclado decrece siendo mínima en las horas de la madrugada. Aunque una capa de mezclado alta no es necesariamente un buen indicador para la dispersión de los contaminantes, dado que implica una alta temperatura e intensa radiación solar, lo que a su vez favorece la reacción fotoquímica de los precursores de otros contaminantes.

Boxplot de todas las líneas en la mañana y en dos temporadas distintas



**Figura 25.** Diagrama de caja y bigotes de las concentraciones ambiente de  $PM_{2.5}$  observadas en las campañas de muestreo de las líneas 1,2 y 7 del Metrobús en el horario de la mañana y en las temporadas seca caliente y seca fría. La línea horizontal (-) muestra la mediana, la marca roja (♦) la media aritmética, los extremos de la caja (□) los percentiles 25 y 75 y los extremos de los bigotes (†) los valores máximos y mínimo.

Boxplot de todas las líneas en la tarde y en dos temporadas distintas

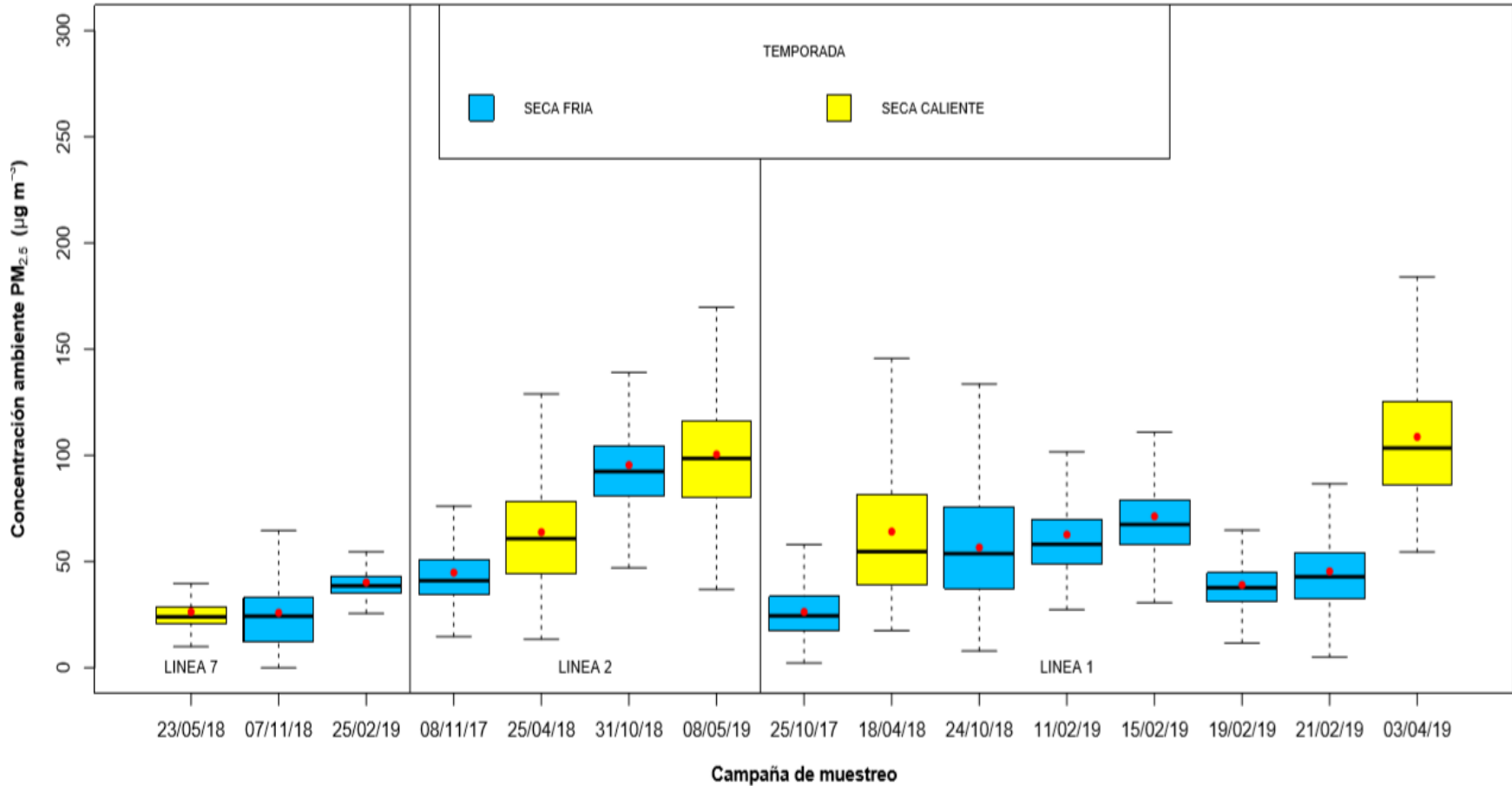


Figura 26. Diagrama de caja y bigotes de las concentraciones ambiente de  $PM_{2.5}$  observadas en las campañas de muestreo de las líneas 1,2 y 7 del Metrobús en el horario de la tarde y en las temporadas seca caliente y seca fría. La línea horizontal (—) muestra la mediana, la marca roja (♦) la media aritmética, los extremos de la caja (□) los percentiles 25 y 75 y los extremos de los bigotes (|) los valores máximos y mínimos.

#### **5.4 Exposición a concentraciones ambiente de PM<sub>2.5</sub> por tiempo realizado y por kilómetro recorrido.**

Como una de las métricas finales del presente proyecto, se realizó una comparación de exposición a concentraciones ambiente de PM<sub>2.5</sub> por tiempo realizado y por kilómetro recorrido de cada uno de los viajes de las líneas 1, 2 y 7 del Metrobús. Para lograr la comparación, se definió un periodo de inhalación - exhalación de 4 a 5 segundos, que es el tiempo del ciclo de respiración que presenta una persona en estado de reposo y en condiciones favorables de salud según un estudio realizado por el Instituto Nacional de enfermedades respiratorias de México.

Teniendo definido el periodo de inhalación – exhalación, se obtuvo el promedio aritmético de las concentraciones ambiente de PM<sub>2.5</sub> registradas durante un ciclo de respiración, se sumaron todos los promedios aritméticos con sus desviaciones estándar y se obtuvieron los valores de la exposición de inhalación a PM<sub>2.5</sub> considerando el tiempo total en minutos transcurrido en cada viaje y los kilómetros recorridos por cada ruta monitoreada (Tabla 7).

Finalmente, se obtuvieron los valores de los niveles de la exposición PM<sub>2.5</sub> por minuto ( $\text{mg}/\text{m}^3 \text{ min}^{-1}$ ) y por kilómetro ( $\text{mg}/\text{m}^3 \text{ km}^{-1}$ ) de cada campaña monitoreada. Los resultados del análisis anterior se presentan en la Tabla 8 y 9 de la siguiente sección.

**Tabla 7.** Registros de los puntos de partida y llegada de cada ruta, y la relación longitud - tiempo de cada uno de los viajes realizados en el Metrobús.

VIAJES REALIZADOS EN EL METROBÚS				
LÍNEA	VIAJE COMPLETO	DISTANCIA (km)	CAMPAÑA	DURACIÓN (min)
1	LA JOYA – INDIOS VERDES – LA JOYA	59.6	25-Oct-2017	172.37 (M)
				173.15 (V)
			18-Abr-2018	175.42 (M)
				223.93 (V)
			24-Oct-2018	172.45 (M)
				174.93 (V)
			11-Feb-2019	170.72 (M)
				176.80 (V)
			15-Feb-2019	175.93 (M)
				174.73 (V)
19-Feb-2019	188.17 (M)			
	186.02 (V)			
21-Feb-2019	180.62 (M)			
	184.20 (V)			
03-Abr-2019	165.67 (M)			
	180.30 (V)			
2	TACUBAYA – TEPALCATES – TACUBAYA	40.0	08-Nov-2017	127.38 (M)
				134.17 (V)
			25-Abr-2018	119.48 (M)
				134.28 (V)
			31-Oct-2018	112.20 (M)
				123.23 (V)
08-May-2019	115.90 (M)			
	113.57 (V)			
7	INDIOS VERDES – CAMPO MARTE – INDIOS VERDES	30.0	23-May-2018	140.35 (M)
				131.40 (V)
			07-Nov-2018	135.52 (M)
				144.50 (V)
			25-Feb-2019	125.43 (M)
				122.02 (V)
<ul style="list-style-type: none"> <li>(M) Tiempo del viaje de la mañana; (V) Tiempo del viaje de la tarde.</li> </ul>				

**Tabla 8.** Exposición a  $PM_{2.5}$  por minuto ( $mg/m^3 \text{ min}^{-1}$ ) y por kilómetro ( $mg/m^3 \text{ km}^{-1}$ ) de cada campaña en las líneas 1,2 y 7 del Metrobús en el horario de la mañana.

<b>VIAJES REALIZADOS EN EL HORARIO DE LA MAÑANA</b>		
<b>LÍNEA 1</b>	<b>LA JOYA – INDIOS VERDES – LA JOYA</b>	
Campaña	Exposición por minuto $mg/m^3 \text{ min}^{-1}$	Exposición por kilómetro $mg/m^3 \text{ km}^{-1}$
25-Oct-2017	$3.03 \pm 0.48$	$8.77 \pm 1.38$
18-Abr-2018	$1.15 \pm 0.18$	$3.39 \pm 0.53$
24-Oct-2018	$1.03 \pm 0.16$	$2.97 \pm 0.47$
11-Feb-2019	$1.21 \pm 0.19$	$3.47 \pm 0.54$
15-Feb-2019	$1.52 \pm 0.24$	$4.50 \pm 0.71$
19-Feb-2019	$1.46 \pm 0.23$	$4.61 \pm 0.72$
21-Feb-2019	$0.90 \pm 0.14$	$2.73 \pm 0.43$
03-Abr-2019	$2.08 \pm 0.33$	$5.78 \pm 0.91$
<b>LÍNEA 2</b>	<b>TACUBAYA – TEPALCATES – TACUBAYA</b>	
Campaña	Exposición por minuto $mg/m^3 \text{ min}^{-1}$	Exposición por kilómetro $mg/m^3 \text{ km}^{-1}$
08-Nov-2017	$1.06 \pm 0.17$	$3.37 \pm 0.53$
25-Abr-2018	$2.32 \pm 0.36$	$6.92 \pm 1.09$
31-Oct-2018	$3.67 \pm 0.57$	$10.28 \pm 1.61$
08-May-2019	$2.24 \pm 0.35$	$6.48 \pm 1.02$
<b>LÍNEA 7</b>	<b>INDIOS VERDES – CAMPO MARTE – INDIOS VERDES</b>	
Campaña	Exposición por minuto $mg/m^3 \text{ min}^{-1}$	Exposición por kilómetro $mg/m^3 \text{ km}^{-1}$
23-May-2018	$0.89 \pm 0.14$	$4.18 \pm 0.66$
07-Nov-2018	$0.78 \pm 0.12$	$3.53 \pm 0.55$
25-Feb-2019	$0.57 \pm 0.09$	$2.38 \pm 0.37$

**Tabla 9.** Exposición a  $PM_{2.5}$  por minuto ( $mg/m^3 \text{ min}^{-1}$ ) y por kilómetro ( $mg/m^3 \text{ km}^{-1}$ ) de cada campaña en las líneas 1,2 y 7 del Metrobús en el horario de la tarde.

<b>VIAJES REALIZADOS EN EL HORARIO DE LA TARDE</b>		
<b>LÍNEA 1</b>	<b>LA JOYA – INDIOS VERDES – LA JOYA</b>	
Campaña	Exposición por minuto $mg/m^3 \text{ min}^{-1}$	Exposición por kilómetro $mg/m^3 \text{ km}^{-1}$
25-Oct-2017	$0.36 \pm 0.06$	$1.03 \pm 0.16$
18-Abr-2018	$0.87 \pm 0.14$	$3.25 \pm 0.51$
24-Oct-2018	$0.76 \pm 0.12$	$2.25 \pm 0.35$
11-Feb-2019	$0.85 \pm 0.13$	$2.51 \pm 0.39$
15-Feb-2019	$0.96 \pm 0.15$	$2.82 \pm 0.44$
19-Feb-2019	$0.53 \pm 0.08$	$1.64 \pm 0.26$
21-Feb-2019	$0.61 \pm 0.10$	$1.89 \pm 0.30$
03-Abr-2019	$1.47 \pm 0.23$	$4.44 \pm 0.70$
<b>LÍNEA 2</b>	<b>TACUBAYA – TEPALCATES – TACUBAYA</b>	
Campaña	Exposición por minuto $mg/m^3 \text{ min}^{-1}$	Exposición por kilómetro $mg/m^3 \text{ km}^{-1}$
08-Nov-2017	$0.60 \pm 0.10$	$2.03 \pm 0.32$
25-Abr-2018	$0.86 \pm 0.14$	$2.89 \pm 0.46$
31-Oct-2018	$1.29 \pm 0.20$	$3.97 \pm 0.62$
08-May-2019	$1.36 \pm 0.21$	$3.85 \pm 0.61$
<b>LÍNEA 7</b>	<b>INDIOS VERDES – CAMPO MARTE – INDIOS VERDES</b>	
Campaña	Exposición por minuto $mg/m^3 \text{ min}^{-1}$	Exposición por kilómetro $mg/m^3 \text{ km}^{-1}$
23-May-2018	$0.36 \pm 0.06$	$1.56 \pm 0.24$
07-Nov-2018	$0.35 \pm 0.05$	$1.69 \pm 0.26$
25-Feb-2019	$0.54 \pm 0.09$	$2.21 \pm 0.35$

Los resultados presentados en las Tablas 8 y 9 muestran la generalización de los valores de exposición a  $PM_{2.5}$ , es decir, no consideran la existencia de regiones de mayores y menores concentraciones que los promedios obtenidos para viajes completos. Sin embargo, la variabilidad de dichas concentraciones de exposición a  $PM_{2.5}$  está descrita en la forma más simple mediante la presentación de la desviación estándar. Para el horario de la mañana, se encontró la mayor exposición a concentraciones  $PM_{2.5}$  en la línea 2, mientras que la menor exposición se presentó en la línea 1 y 7. A pesar de que la línea 1 tiene aproximadamente 20 km más de extensión respecto a la línea 2, se observaron cambios significativos en los niveles exposición a  $PM_{2.5}$  en esta última línea, lo que evidencia una vez más que la emisión de partículas de autobuses diésel altamente contaminantes permite una mayor exposición de  $PM_{2.5}$  en usuarios a bordo de estos autobuses.

La mayor exposición de  $PM_{2.5}$  se presentó en la línea 1 y 2 en los viajes del día 31 de octubre de 2018 y 25 de octubre de 2017, respectivamente. El primer viaje registró los valores más altos de  $PM_{2.5}$  entre  $10.28 \pm 1.61 \text{ mg/m}^3 \text{ km}^{-1}$ , mientras que en el segundo viaje la inhalación de  $PM_{2.5}$  osciló entre  $8.77 \pm 1.38 \text{ mg/m}^3 \text{ km}^{-1}$ , respectivamente. La menor exposición por kilómetro recorrido se registró en el último muestreo de la línea 7, con valores cercanos a los  $2.38 \pm 0.37 \text{ mg/m}^3 \text{ km}^{-1}$ , siendo el viaje con los valores más bajos de exposición a  $PM_{2.5}$  del periodo de muestreo (Tabla 8).

La exposición de  $PM_{2.5}$  estimada por kilómetro para el caso del horario de la tarde se comportó de manera similar al horario de la mañana, sin embargo, las variaciones en la concentración de  $PM_{2.5}$  fueron menores. La menor concentración de exposición a  $PM_{2.5}$  se presentó nuevamente para la línea 7 oscilando entre  $1.56 \pm 0.24 \text{ mg/m}^3 \text{ km}^{-1}$  y  $2.21 \pm 0.35 \text{ mg/m}^3 \text{ km}^{-1}$ , mientras que las mayores exposiciones a  $PM_{2.5}$  calculadas se presentaron en la línea 2 y 1, valores que oscilaron entre  $2.03 \pm 0.32 \text{ mg/m}^3 \text{ km}^{-1}$  y  $3.97 \pm 0.62 \text{ mg/m}^3 \text{ km}^{-1}$  para la línea 2 y entre  $1.03 \pm 0.16 \text{ mg/m}^3 \text{ km}^{-1}$  y  $4.44 \pm 0.70 \text{ mg/m}^3 \text{ km}^{-1}$  para la línea 1. Para todos los viajes realizados, la mayor exposición de  $PM_{2.5}$  encontrada correspondió al viaje del 03 de abril de 2019 ( $4.44 \pm 0.70 \text{ mg/m}^3 \text{ km}^{-1}$ ) y al viaje del 31 de octubre de 2018 ( $3.97 \pm$



0.62 mg/m<sup>3</sup> km<sup>-1</sup>), mientras que la menor correspondió al viaje del 25 de octubre de 2017 (3.97 ± 0.62 mg/m<sup>3</sup> km<sup>-1</sup>), respectivamente.

Las Tablas 8 y 9 también muestran que la exposición de PM<sub>2.5</sub> por tiempo empleado es más uniforme en comparación con la exposición por kilómetro recorrido. Es decir, entre menor tiempo permanezcan los usuarios dentro del autobús y recorra menores distancias en sus traslados de un lugar a otro, la variación y la exposición a los niveles de PM<sub>2.5</sub> disminuirá considerablemente.

---

## 6. CONCLUSIONES

---

Mediante el análisis estadístico de las series de tiempo de las concentraciones de  $PM_{2.5}$ , se pudieron identificar los patrones de exposición a  $PM_{2.5}$  en las líneas del Metrobús seleccionadas, así como el comportamiento temporal de  $PM_{2.5}$  durante el periodo muestreado. En el presente estudio, se concluye que, en todas las líneas monitoreadas, los niveles de concentración de  $PM_{2.5}$  tienen un comportamiento similar al circadiano, teniendo concentraciones de  $PM_{2.5}$  más elevadas en el horario de la mañana. Lo que indica que el ciclo diurno de la fracción respirable  $PM_{2.5}$  probablemente se ve más afectado por un aumento en las actividades diarias de la población durante las horas de la mañana, tiempo en el que estas partículas permanecen en suspensión durante varias horas.

Además, fenómenos naturales cotidianos como la capa de mezclado y las inversiones térmicas son más frecuentes durante la mañana, lo que causa un estancamiento temporal de las masas de aire en la atmósfera, e inhibe la capacidad de autodepuración de ésta y favorece la acumulación de contaminantes. Estos fenómenos climatológicos pueden ser otras de las posibles causas de observar niveles de concentración de  $PM_{2.5}$  más elevados en las primeras horas del día, ya que el estancamiento de contaminantes disminuye de manera gradual al transcurrir el día, llegando a tener una menor dispersión de contaminantes en el horario de la tarde.

Por otro lado, comparado los niveles de concentración de  $PM_{2.5}$  de todas las líneas monitoreadas, se puede observar que las concentraciones promedio de  $PM_{2.5}$  en línea 7 son significativamente menores en comparación con las concentraciones observadas en las líneas 1 y 2 del Metrobús. Parte de las concentraciones bajas que se midieron en la línea 7 se debe en gran medida a los requerimientos operativos de esta línea, ya que los autobuses utilizados cumplen con estándares internacionales, y medioambientales que permiten reducir hasta en 89 % las emisiones contaminantes, con ello este corredor asegura un sistema de transporte

amigable al ambiente con los parámetros de cumplimiento más altos, centrándose en la reducción partículas  $PM_{2.5}$  emitidas.

La inmisión de  $PM_{2.5}$  en este tipo de autobús es considerablemente menor en comparación con modelos más viejos utilizados en otras líneas del Metrobús (línea 1 y 2). Siendo la auto contaminación del propio autobús un factor que contribuye de manera importante a elevar los niveles de exposición personal a  $PM_{2.5}$ . Sin embargo, no es el único factor sobre la marcha del recorrido que llega a afectar las concentraciones de  $PM_{2.5}$  dentro del autobús, también, lo es, aunque en menor proporción la exposición a  $PM_{2.5}$  proveniente del ambiente exterior, mediante el flujo de aire de ventilación a través de las ventanillas y escotillas abiertas del mismo autobús. El sistema cuenta con varias rutas largas, con conexiones amplias y directas con la superficie para la ventilación, por lo que la entrada de  $PM_{2.5}$ , combinada con fuentes internas, por ejemplo, combustión en interiores y resuspensión de partículas afecta directamente la calidad del aire en interiores.

El efecto anterior indica que cualquier microambiente exterior representa el mismo riesgo de exposición a este tipo de contaminante (principalmente para el horario de la mañana) y que las concentraciones de  $PM_{2.5}$  están determinadas principalmente por la hora del día, y están fuertemente influenciadas por el tipo de microambiente, es decir, por el tipo de autobús utilizado.

Finalmente, el análisis descriptivo señaló que la exposición a  $PM_{2.5}$  fue mayor durante la temporada seca caliente y menor durante la temporada seca fría. Lo anterior se puede deber a que, las altas temperaturas presentes en la temporada seca caliente hacen que los niveles de concentración de  $PM_{2.5}$  aumenten, principalmente en los meses de verano, favoreciendo la formación de aerosoles secundarios durante parte del día. Además, las concentraciones de  $PM_{2.5}$  tuvieron un patrón de distribución diferente entre cada línea, horario y temporada, mostrando un patrón de distribución muy similar y un mejor comportamiento en la línea 7 (con pequeñas variaciones en las concentraciones de  $PM_{2.5}$  entre horarios y temporadas), mientras que en las líneas 1 y 2, el patrón de distribución fue poco similar.

Cómo se ha venido observando a lo largo de este trabajo, las concentraciones de  $PM_{2.5}$  continúan superando los valores recomendados por las NOM de salud ambiental vigentes en México y los valores guía de la OMS. Al comparar los resultados de las concentraciones promedio registradas en cada viaje con los valores recomendados, se puede observar que se rebasaron estos valores en menos de 24 horas. Las excedencias se presentaron principalmente en la línea 1 y 2 del Metrobús. Aunque todos los resultados anteriores son evidencia de que la línea 2 del Metrobús fue la línea más contaminada del periodo de muestreo, superando en los dos horarios monitoreados los valores normales y de referencia de  $PM_{2.5}$ .

---

## 7. RECOMENDACIONES

---

La reducción de la inhalación de  $PM_{2.5}$  de los pasajeros del transporte público podría lograrse mediante la introducción de tecnologías diésel más limpias actualmente disponibles en el mercado o inclusive la incorporación de tecnologías más convencionales que no utilicen como combustible componentes derivados del petróleo, como lo son las nuevas unidades eléctricas con las que el gobierno de la Ciudad de México busca mejorar y hacer más eficiente el sistema de transporte Metrobús.

Por lo anterior, es necesario poner en funcionamiento estrategias de control y reducción de las emisiones de  $PM_{2.5}$ . Se debe planificar la administración de los medios de transporte ya existentes, esto con la finalidad de ofrecer soluciones prometedoras para minimizar la exposición a  $PM_{2.5}$  y reducir las afectaciones de la población a causa de la emisión de contaminantes en dichos medios.

---

## REFERENCIAS

---

- Adams, H., Nieuwenhuijsen, M., & Colville, R. (2001). Determinants of fine particle PM<sub>2.5</sub> personal exposure levels. *Atmospheric Environment*, 4557-4566.
- Artiñano, B., Salvador, P., Alonso, D., Querol, X., & Alastuey, A. (2007). Anthropogenic and natural influence on the PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> aerosol in Madrid (Spain). Analysis of high concentration episodes. *Environmental Pollution* 125, 453-465.
- Blanco, J., Altúzar, F., Jiménez, B., Aguilar, G., Pablo, M., & Benitez, M. (2015). *Evaluación de partículas suspendidas PM<sub>2.5</sub> en el Área Metropolitana de Monterrey*. MÉXICO: INEEC, 39.
- Cano, J. (2019). *Determinación de las zonas de mayor exposición personal a PM<sub>2.5</sub> en el sistema de transporte colectivo de la CDMX*. México: Ciudad Universitaria.
- Cárdenas, G. (2019). Contaminación Atmosférica, riesgo persistente. *Ciencia UNAM, DGDC*.
- Cesar, H., Borja Aburto, V., Muñoz Cruz, R., Brander, L., Cropper, M., & et al. (28 de Febrero de 2002). *Improving air quality in metropolitan Mexico City: an economic valuation*. Obtenido de The World Bank.:  
<http://documents.worldbank.org/curated/en/2002/02/1703259/improving-air-quality-metropolitan-mexico-city-economic-valuation>.
- Chen, J., Ying, Q., & Kleeman, M. (2009). Source apportionment of visual impairment during the California regional PM<sub>10</sub>/PM<sub>2.5</sub> air quality study. *Atmospheric Environment*, 43, 6139 - 6144.
- Duan, N. (1982). Modelos para la exposición humana a la contaminación del aire. *Environ*, 305-309.
- Falcon-Rodríguez, C. I. (2016). *Aeroparticles, Composition, and Lung Diseases*. Obtenido de *Frontiers in Immunology*, 7(3): <https://doi.org/10.3389/fimmu.2016.00003>
- García, G. (2000). Proyecto de monitoreo ambiental, micro ambiental y de exposición personal a partículas menores a diez micrómetros y menores a 2.5 micrometros en la ZMVM. UAM Iztapalapa. México.: Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental.
- GARMIN. (10 de Octubre de 2019). Obtenido de <https://www.garmin.com/es-MX/marq/>
- Heal, M., Kumar, P., & Harrison, R. (2012). Particles, air quality, policy and Health. *Chemical Society Reviews* 41, 6606-6630.
- Hernandez Paniagua, I., Andraca Ayala, G., Ayala, U., Ruiz Suarez, L., Zavala Reyes, J., Cid Juarez, S., . . . Jazcilevich, A. (2018). Personal Exposure to PM<sub>2.5</sub> in the Megacity of Mexico: A Multi-Mode Transport Study. *Atmosphere*, 9, 10-14.
- ICCT. (2017). *(The International Council on Clean Transportation)*. Obtenido de Reporte determinación de emisiones de vehículos del Metrobús:  
<http://www.data.metrobus.cdmx.gob.mx>.

- INECC. (2004). *Evaluación de los beneficios en la exposición personal de pasajeros por la instrumentación de cambios en el transporte público*. Ciudad de México.
- INECC. (2017). *Estudio para determinar la exposición personal a CO, PM2.5 y BTEX, en Salamanca, Guanajuato*. México: SEMARNAT.
- Kampa , M., & Castanas, E. (2008). Human health effects of air pollution. *Environmental Pollution*, 151 (2), 362-367.
- Linares, C., & Diaz, J. (2008). Impact of high temperatures on hospital admissions: comparative analysis with previous studies about mortality. *Madrid: Eur J Public Health* 18. 317-322.
- Linares, C., & Díaz, J. (2010). *Las causas de la contaminación atmosférica y los contaminantes atmosféricos más importantes*. España: Contaminación atmosférica y Salud.
- Linares, C., & Diaz, J. (2010). Short-term effect of concentrations of fine particulate matter on hospital admissions due to cardiovascular and respiratory y causes among the over-75 age group in Madrid, Spain. *Public Health*. 124, 28-36.
- López, M., & Pérez, I. (2014). Valoración económica de los beneficios a la salud de la población que se alcanzarían por la reducción de las PM2.5 en tres zonas metropolitanas mexicanas. México: INECC. 51.
- Mancilla, Y., Mendoza, A., Herckes, P., & Fraser, M. (Junio 2014). Source Apportionment of PM2.5 based on molecular organic marker in Monterrey, México. California, Estados Unidos: A&WMA's 107th Annual Conference & Exhibition. Paper 33604.
- Martínez, A., & Ugalde, F. (2012). *Identificación de metales en partículas finas (PM2.5) durante la época seca-fría en la ciudad de Toluca*. Obtenido de [http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/40/098/40088356.pdf](http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/40/098/40088356.pdf)
- Ministerio del medio ambiente. (2018). *Pronóstico de la calidad del aire*. Obtenido de Santiago, Chile: <http://www.airechile.mma.gob.cl/faq>
- Molina M. (2000). *Área Metropolitana de la Ciudad de México: Prácticas de Desplazamiento y Horarios Laborales, en: Proyecto para el Diseño de una Estrategia Integral de Gestión de la Calidad del Aire en el Valle de México 2001-2010*. México: Massachusetts Institute.
- Nolasco, B. (2015). *Nefelometría y Turbidimetría. Características y Equipos Utilizados*. San Juan Bautista Tuxtepec, Oaxaca. México: Instituto Tecnológico de Tuxtepec.
- Okokon, E., Yli-Tuomi, T., Turunen, A., Taimisto , P., Pennanen , A., Vouitsis, I., . . . Lanki, T. (2017). Particulates and noise exposure during bicycle, bus and car commuting: A study in three European cities. *Environmental Research*. 154, 181-189.
- OMS. (2014). *Organización Mundial de la Salud*. . Obtenido de Contaminación del aire ambiental.: <https://www.who.int/airpollution/data/en/>.
- OMS. (2018). *Organización Mundial de la Salud*. Obtenido de Calidad del Aire y Salud: [http://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](http://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)

- OMS. (2019). *Organización Mundial de la Salud*. Obtenido de Global Ambient Air Quality Database: <https://www.who.int/airpollution/data/cities/en/>.
- Ott, E. (1985). Exposición humana total, medio ambiente. *Sci. Technol.*
- Peters, J. e. (2004). A study of 12 Southern California communities with differing levels and types of air pollution. I. Prevalence of respiratory morbidity. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*. 760-767.
- Pope, C., Burnett, R., Thun, M., Calle, E., Krewski, D., Ito, K., & Thurston, C. (2002). Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and longterm exposure to fine particulate air pollution. *JAMA*, 287(9), 1132-1141.
- Portal Oficial del Metrobús de la Ciudad de México. (15 de Octubre de 2019). *Metrobús*. Obtenido de <https://www.metrobus.cdmx.gob.mx/>
- PROAIRE. (2018). *Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire en el Estado de México*. México.
- Quiros, D., Lee, E., Wang, R., & Zhu, Y. (2013). Ultrafine particle exposures while walking, cycling, and driving along an urban residential roadway. *Atmospheric environment* 73. 185-194.
- RStudio. (20 de Agosto de 2019). Obtenido de <https://rstudio.com/>
- SEDEMA. (2017). *Calidad del aire en la Ciudad de México, Informe 2016*. Ciudad de México.: Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire, Dirección de Monitoreo Atmosférico.
- SEDEMA. (2018). *Calidad del aire en la Ciudad de México, Informe 2017*. Ciudad de México. : Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire, Dirección de Monitoreo Atmosférico.
- SEDEMA. (2019). *Secretaría del Medio Ambiente*. Obtenido de Gobierno de las Ciudad de México: <http://www.sedema.cdmx.gob.mx>
- SEMARNAT. (2013). *Calidad del aire: una práctica de vida*. México D.F: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Gestión Ambiental.
- SEMARNAT. (2019). *Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal, Inventario Nacional de Emisiones de Contaminantes Criterio*. México, D.F. : INEM .
- Smith, J., Mitsakou, C., Barratt, B., Walton, H., Taylor, J., & Beevers, S. (2016). London hybrid exposure model: Improving human exposure estimates to NO<sub>2</sub> and PM<sub>2.5</sub> in an Urban setting. *Environmental Science and Technology* 50(21). 11760-11768.
- Spengler, J., Treitman, R., Tosteson, T., Mage, D., & Soczek, M. (1985). Exposiciones personales a partículas respirables e implicaciones para la epidemiología de la contaminación del aire. *Environ. Sci Technol.* 19. 700-707.
- ThermoScientific. (30 de Agosto de 2019). *ThermoFisher Scientific*. Obtenido de <https://www.thermofisher.com/mx/es/home/life-science/lab-plasticware-supplies/lab-products-catalog.html>



- Tiburcio, A. (2019). Estudio de la exposición personal a PM2.5 en el sistema de transporte colectivo de la Ciudad de México. Ciudad Universitaria, CDMX.
- Universidad Autónoma Metropolitana. (2016). *Contaminación Atmosférica de la Zona Metropolitana del Valle de México y sus efectos en la salud*. CDMX: Maestría en Diseño, Información y Comunicación.
- Vallejo, M., Lerma, C., Infante, O., Hermosillo, A., Riojas, H., & Cárdenas, M. (2004). Personal exposure to particulate matter less than 2.5 micrometros in Mexico City: pilot study. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 14, 323-329.
- Velasco, E., Retama, A., Segovia, E., & Ramos, R. (2019). *Particle exposure and inhaled dose while commuting by public transport in Mexico City*. Atmospheric Environment 219.
- Wallace, L., Pellizzari, E., Hartwell, T., Sparacino, C., Sheldon, L., & Zelon, H. (1985). Las exposiciones personales. las relaciones interiores-exteriores y los niveles de respiración de contaminantes tóxicos del aire medidos por 355 personas en Nueva Jersey. *Atmosfera, Reinar*.19. 1651-1661.
- Wang, Z., Calderón, L., P. Patton, A., Allacci, M. S., Senick, J., Wener, R., . . . Mainelis, G. (2016). Comparison of real-time instruments and gravimetric method when measuring particulate matter in a residential building. *JOURNAL OF THE AIR & WASTE MANAGEMENT ASSOCIATION* , VOL. 66, NO. 11, 1109–1120 .
- Zuocheng Wang, L. C. (2016). Comparison of real-time instruments and gravimetric method when measuring particulate matter in a residential building. . *JOURNAL OF THE AIR & WASTE MANAGEMENT ASSOCIATION*, VOL. 66, NO. 11, 1109–1120.

## **ANEXO I. Calibración del pDR.**

La EPA (Environmental Protection Agency) define a la calibración como la comparación de un estándar de medición, o de un equipo, con un estándar o equipo de mayor exactitud, para detectar y cuantificar imprecisiones y reportarlas o eliminarlas mediante un ajuste. En este sentido, la calibración es la actividad de control de calidad más importante dentro de la medición, ya que establece la relación del valor medido por un equipo con la de un valor convencionalmente real, dando validez y trazabilidad a la medición.

Antes de implementar cualquier actividad de medición, se recomienda que los equipos (analizadores, monitores, muestreadores y sensores) sean revisados para asegurar que se encuentran dentro de las tolerancias de calibración, y de no ser así, los equipos deberán ser debidamente calibrados in-situ.

Los equipos pDR-1500 son calibrados de fábrica usando estándares trazables del Instituto Nacional de Estándares y Pruebas (NIST). 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 y para ello se realizan los siguientes procedimientos:

### **1. Calibración “cero” del pDR-1500.**

Un procedimiento previo a los días de campaña de monitoreo es la calibración “cero” del flujo establecido para los equipos pDR (Fig. 27). La calibración consiste en:

- 1) Conectar el cargador del pDR al enchufe de luz.
- 2) Colocar el ciclón correspondiente (ciclón estándar) y conectar una manguera en forma de recirculación en el pDR.
- 3) Verificar que el pDR tenga su filtro correspondiente y en posición adecuada, de lo contrario, colocar un filtro.
- 4) Encender el equipo con el botón de encendido/apagado.

- 5) Seleccionar "Operate" y buscar la opción de "Zero Instrument Filter Ready", presionar "Enter" y esperar hasta que el equipo termine la calibración (Aprox. 5 minutos).
- 6) Al terminar el proceso de calibración, retirar la manguera, apagar el equipo y desconectar el cargador.



*Figura 27. Calibración "cero" del pDR-1500.*

## **2. Calibración del flujo en el pDR-1500.**

- 1) Conectar el cargador del pDR al enchufe de luz.
- 2) Realizar la calibración "0", descrita en el punto I.
- 3) Al terminar el proceso de calibración, retirar la manguera de recirculación y colocar el ciclón "Blue Cyclone" (1-4  $\mu\text{m}$ ) y verificar en el menú del pDR que se encuentre habilitada esta opción.
- 4) Colocar el soporte del ciclón, y conectar una manguera de la succión del pDR a la salida de un gasómetro (Fig 28).
- 5) Encender el equipo, seleccionar la opción "Configure" y posteriormente la opción "Flow rate" y establecer el flujo programado al cual se requiere trabajar.
- 6) Regresar al menú principal y seleccionar la opción "Operate" y posteriormente la opción "Start Run".

- 7) Registrar el volumen de aire que pasa a través del equipo (pDR) en un tiempo definido, anotando el volumen inicial y los volúmenes finales de cada intervalo de tiempo y de las diferentes corridas.
- 8) Al finalizar la calibración, pasar los datos obtenidos a un libro de Excel, posteriormente apagar el equipo y desconectar el cargador.



*Figura 28. Calibración del flujo del pDR-1500.*

El gasómetro comercial es utilizado como referencia del volumen real que puede circular a través de la bomba de succión del pDR. Es un gasómetro que se encuentra calibrado para medir flujos de gas natural, por lo cual, los datos obtenidos (volúmenes de gas natural) tienen que ser ajustados con un factor de corrección para aire. Para lo anterior, se utilizó una relación de densidades de ambos gases.

El factor de corrección (K) puede ser calculado de la siguiente manera:

$$K = \sqrt{\frac{d_1}{d_2}}$$

Donde:

$$d_1 = 0.78 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} = \text{densidad del gas natural}$$

$$d_2 = 1.2050 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} = \text{densidad del aire}$$

Sustituyendo valores:

$$K = \sqrt{\frac{0.78 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}}{1.2050 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}}} = 0.8046$$

El factor K debe ser multiplicado por el flujo promedio resultante de cada calibración. De esta manera, se obtiene el flujo de aire que pasa por la bomba de succión del pDR.

En la Tabla 10 se muestra un ejemplo de la calibración del flujo real corregido del pDR realizada con un flujo programado de 1.70 litros por minuto (LPM) en un intervalo de tiempo de 3 minutos.

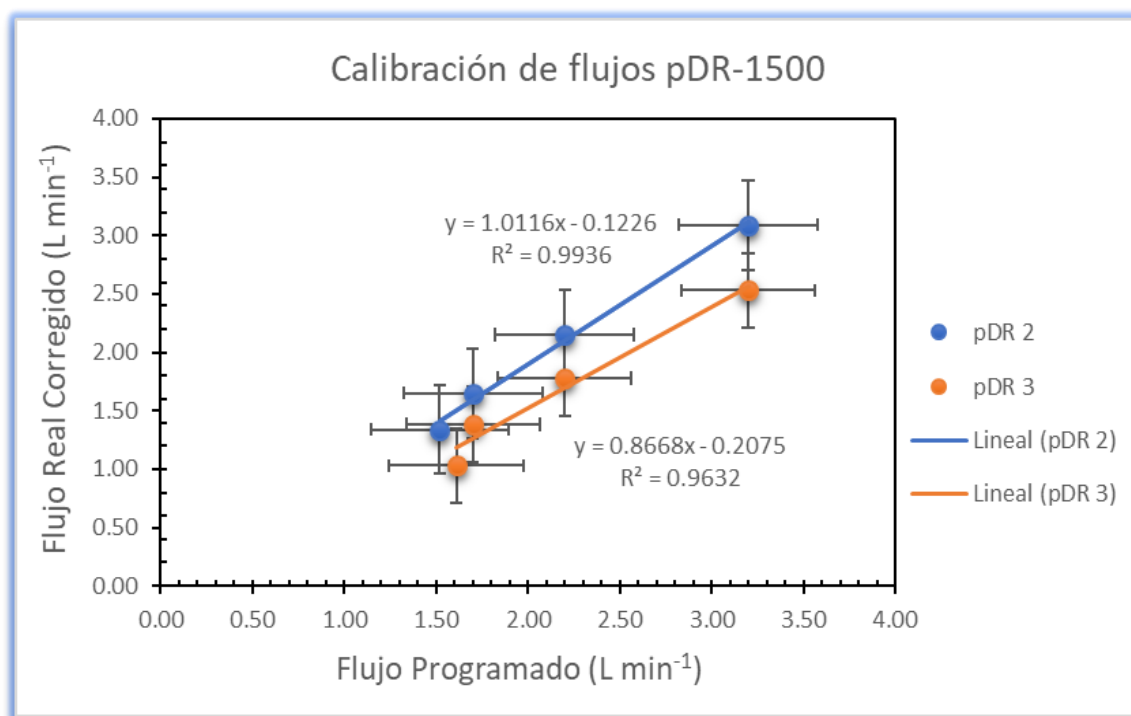
**Tabla 10.** calibración del pDR realizada con un flujo programado de 1.70 litros por minuto (LPM) en un intervalo de tiempo de 3 minutos.

Flujo Muestreo	t (min)	V <sub>f</sub> (dm <sup>3</sup> )	Δ Volumen (dm <sup>3</sup> )	Δ Volumen (L)	Flujo Real (L min <sup>-1</sup> )	Flujo Corregido (L min <sup>-1</sup> )
1.70 LPM	0.00	84421.30	-	-	-	-
	3.00	84426.40	5.10	5.10	1.70	1.37
	6.00	84431.60	10.30	10.30	1.72	1.38
	9.00	84436.80	15.50	15.50	1.72	1.39
	12.00	84441.90	20.60	20.60	1.72	1.38
	15.00	84447.00	25.70	25.70	1.71	1.38
<b>F. corrección (K)</b>			0.80455137		<b>Promedio</b>	1.38

Todas las calibraciones de los pDRs fueron realizadas a varios flujos programados con intervalos de tiempo de 2, 3 y 4 minutos. En la Tabla 11 se muestran los flujos reales corregidos correspondientes a cada uno de los flujos programados en el pDR.

**Tabla 11.** Flujos reales corregidos correspondientes a cada uno de los flujos programados en el pDR.

pDR 2		pDR 3	
Flujo Programado (LPM)	Flujo Real Corregido (LPM)	Flujo Programado (LPM)	Flujo Real Corregido (LPM)
1.70	1.65	1.70	1.38
2.20	2.15	2.20	1.78
3.20	3.09	3.20	2.53
1.52	1.34	1.61	1.03



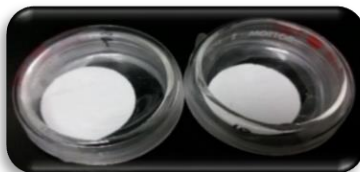
**Figura 29.** Corrección de los flujos programados de PDRs.

La Figura 29 nos presenta la relación que nos permite obtener el valor de flujo al cual debe ser programado cada equipo pDR para realizar las mediciones a un flujo de aire requerido de 1.52 LPM.

## ANEXO II. Validación gravimétrica y factores de corrección.

### 1. Metodología de estabilización de filtros.

1) Rotular la caja Petri donde se almacenará cada filtro y sellar con papel Parafilm.



*Figura 30. Filtros usados en las campañas de monitoreo, almacenados en cajas Petri.*

2) Colocar los filtros en una cámara de secado con gel de sílice para reducir el exceso de humedad de éstos. La estabilización dura aproximadamente 24 horas.

3) Registrar el peso del filtro con ayuda de la balanza analítica marca Sartorius, para el posterior análisis de gravimetría.



*Figura 31. Balanza analítica Sartorius.*

4) Posterior al registro del peso de cada filtro, se hace nuevamente la estabilización del secado.

### 2. Características y especificaciones de los filtros.

*Tabla 12. Especificaciones de filtros para pDR.*

<b>MARCA</b>	Whatman
<b>MODELO</b>	934-AH
<b>DESCRIPCIÓN</b>	Circles 37 mm
<b>SUPERFICIE</b>	Suave
<b>MATERIAL</b>	Fibra de vidrio
<b>PESO (g m<sup>-2</sup>)</b>	64
<b>ESPESOR (µm)</b>	435
<b>RETENCIÓN DE PARTÍCULA (µm)</b>	1.5

### 3. Cálculo de la masa de PM<sub>2.5</sub>.

#### ➤ Masa de PM<sub>2.5</sub> medida por pDR.

Para calcular la masa de PM<sub>2.5</sub> medida por los pDR's durante las campañas de monitoreo, se siguieron los siguientes pasos:

- I. Convertir el flujo de aire de litros por minuto a litros por segundo.

$$\text{Flujo de aire (l seg}^{-1}\text{)} = \text{Flujo de aire (l min}^{-1}\text{)} \times \left[ \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ seg}} \right]$$

- II. Calcular el volumen de aire muestreado (en litros):

$$\text{Volumen de aire muestreado (l)} = \text{Flujo de aire (l seg}^{-1}\text{)} \times \text{tiempo de muestreo (seg)}$$

- III. Convertir el volumen de aire muestreado de litros a metros cúbicos.

$$\text{Volumen de aire muestreado (m}^3\text{)} = \text{Volumen de aire muestreado (l)} \times \left[ \frac{1 \text{ m}^3}{1 \times 10^3 \text{ l}} \right]$$

- IV. Calcular la masa de la partícula (en microgramos):

$$\begin{aligned} \text{Masa de partícula (}\mu\text{g)} &= \\ \text{Concentración de partícula (}\mu\text{g m}^{-3}\text{)} &\times \text{Volumen de aire muestreado (m}^3\text{)} \end{aligned}$$

#### ➤ Masa de PM<sub>2.5</sub> obtenida de la gravimetría.

La masa de PM<sub>2.5</sub> fue obtenida por análisis gravimétrico, una técnica de laboratorio utilizada para determinar la masa de PM<sub>2.5</sub> midiendo un cambio en los pesos de los filtros utilizados en las campañas de monitoreo y en las validaciones que se realizaron en la estación de monitoreo fija instalada en el Centro de Ciencias de la Atmósfera-UNAM que forma parte de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) de la Ciudad de México.

La masa de la partícula en gramos se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Masa de partícula (g)} = \text{Peso inicial del filtro (g)} - \text{Peso final del filtro (g)}$$



En microgramos:

$$\text{Masa de partícula } (\mu\text{g}) = \text{Masa de partícula } (g) \times \left[ \frac{1 \times 10^6 \mu\text{g}}{1 g} \right]$$

La Tabla 13 muestra la comparación de las masas de PM<sub>2.5</sub> obtenidas de las mediciones con pDR y por análisis gravimétrico de las campañas de monitoreo y de las validaciones realizadas en el periodo de muestreo 2018-2019.

**Tabla 13.** Valores de las masas de PM<sub>2.5</sub> obtenidas por medición y por gravimetría.

	Fecha	Filtro		Masa de PM <sub>2.5</sub> (μg)			
				pDR2		pDR3	
		pDR 2	pDR 3	Gravimetría	Medida	Gravimetría	Medida
Validación (RAMA)	22-mar-19	I	J	15.00	8.01	10.00	7.68
	27-mar-19	K	L	25.00	9.22	20.00	8.17
	24-abr-19	Ñ	O	37.50	23.78	60.00	22.20
	03-may-19	P	Q	36.67	13.35		
	04-sep-19	F1	E1	10.00	8.60	5.00	8.51
	12-sep-19	H1	G1	15.00	9.55	20.00	19.19
Campaña (Metrobús)	11-feb-19	1	2			70.00	19.13
	15-feb-19	3	4	30.00	20.01	20.00	21.2
	19-feb-19	B	A	35.00	17.82	35.00	16.69
	21-feb-19	C	D	35.00	14.33	60.00	12.56
	25-feb-19	E	F	10.00	9.07	40.00	8.61
	03-abr-19	M	N	70.00	30.13	25.00	27.28
	08-may-19	A1	B1				
	24-oct-18	T	U			20.00	25.24
	31-oct-18	R	S	20.00	13.35	60.00	9.26
	07-nov-18	V	W	10.00	6.00	30.00	16.41
	Datos eliminados por ser valores negativos						
	Datos que no son considerados para calcular el FC del pDR3 por salirse de la tendencia						

### ANEXO III. Estadísticos de las campañas de muestreo.

*Tabla 14. Estadísticos de la Línea 7.*

Estadístico	Campañas de muestreo de la línea 7					
	23-may-18		07-nov-18		25-feb-19	
	Mañana	Tarde	Mañana	Tarde	Mañana	Tarde
Mínimo	39.52	9.10	32.94	2.34	21.82	25.60
Primer Cuartil (25%)	48.95	20.96	49.47	12.05	32.72	35.10
Mediana	69.78	23.97	55.94	24.25	41.70	38.59
Media aritmética	66.12	26.32	57.92	25.93	42.22	40.24
Tercer Cuartil (75%)	78.57	28.45	63.51	33.16	49.90	42.90
Máximo	120.34	40.10	87.60	65.51	77.80	54.94

*Tabla 15. Estadísticos de la Línea 2.*

Estadístico	Campañas de muestreo de la línea 2							
	08-nov-17		25-abr-18		31-oct-18		08-may-19	
	Mañana	Tarde	Mañana	Tarde	Mañana	Tarde	Mañana	Tarde
Mínimo	22.26	14.66	108.10	13.38	152.60	47.06	84.73	36.87
Primer Cuartil (25%)	67.97	34.31	154.80	44.34	219.70	80.99	143.81	80.37
Mediana	77.74	40.98	168.80	60.81	241.80	92.39	166.26	98.57
Media aritmética	78.43	44.81	171.50	63.85	271.50	95.44	165.56	100.46
Tercer Cuartil (75%)	91.13	51.04	184.10	78.20	306.20	104.22	188.88	116.33
Máximo	136.50	77.45	231.50	140.70	440.20	141.81	260.32	171.30

*Tabla 16. Estadísticos de la Línea 1.*

Estadístico	Campañas de muestreo de la línea 1							
	25-oct-17		18-abr-18		24-oct-18		11-feb-19	
	Mañana	Tarde	Mañana	Tarde	Mañana	Tarde	Mañana	Tarde
Mínimo	21.68	2.20	41.75	17.49	27.50	7.92	51.29	27.35
Primer Cuartil (25%)	96.62	17.31	76.00	38.76	57.29	37.30	74.05	48.72
Mediana	170.53	24.46	84.80	54.63	74.51	53.73	85.11	58.14
Media aritmética	224.52	26.30	85.36	64.11	75.93	56.63	89.69	62.71
Tercer Cuartil (75%)	329.66	33.61	93.37	81.53	93.47	75.83	103.86	69.89
Máximo	690.30	56.64	135.41	141.37	151.59	133.65	153.00	102.10
Estadístico	15-feb-19		19-feb-19		21-feb-19		03-abr-19	
	Mañana	Tarde	Mañana	Tarde	Mañana	Tarde	Mañana	Tarde
	Mínimo	53.29	30.65	16.64	9.21	6.91	4.97	58.02
Primer Cuartil (25%)	82.28	57.80	70.40	31.29	29.52	32.66	137.07	86.25
Mediana	101.09	67.45	95.22	37.71	51.55	42.83	151.37	103.40
Media aritmética	112.93	71.28	108.08	39.01	66.81	45.39	153.90	108.73
Tercer Cuartil (75%)	140.17	79.07	133.66	44.71	98.45	54.24	167.07	125.41
Máximo	223.50	108.10	230.52	70.00	200.10	85.10	220.52	190.30

**Tabla 17. Estadísticos de las líneas monitoreadas por horario.**

Estadístico	Campañas de muestreo (Horario Mañana y Tarde)							
	Horario Mañana							
	Línea 1							
	25-oct-17	18-abr-18	24-oct-18	11-feb-19	15-feb-19	19-feb-19	21-feb-19	03-abr-19
Mínimo	21.68	41.75	27.50	51.29	53.29	16.64	6.91	58.02
Primer Cuartil (25%)	96.62	76.00	57.29	74.05	82.28	70.40	29.52	137.07
Mediana	170.53	84.80	74.51	85.11	101.09	95.22	51.55	151.37
Media aritmética	224.52	85.36	75.93	89.69	112.93	108.08	66.81	153.90
Tercer Cuartil (75%)	329.66	93.37	93.47	103.86	140.17	133.66	98.45	167.07
Máximo	690.30	135.41	151.59	153.00	223.50	230.52	200.10	220.52
	Línea 1			Línea 2				
	23-may-18	07-nov-18	25-feb-19	08-nov-17	25-abr-18	31-oct-18	08-may-19	
Mínimo	39.52	32.94	21.82	22.26	108.10	152.60	84.73	
Primer Cuartil (25%)	48.95	49.47	32.72	67.97	154.80	219.70	143.81	
Mediana	69.78	55.94	41.70	77.74	168.80	241.80	166.26	
Media aritmética	66.12	57.92	42.22	78.43	171.50	271.50	165.56	
Tercer Cuartil (75%)	78.57	63.51	49.90	91.13	184.10	306.20	188.88	
Máximo	120.34	87.60	77.80	136.50	231.50	440.20	260.32	
	Horario Tarde							
	Línea 1							
	25-oct-17	18-abr-18	24-oct-18	11-feb-19	15-feb-19	19-feb-19	21-feb-19	03-abr-19
Mínimo	2.20	17.49	7.92	27.35	30.65	9.21	4.97	54.50
Primer Cuartil (25%)	17.31	38.76	37.30	48.72	57.80	31.29	32.66	86.25
Mediana	24.46	54.63	53.73	58.14	67.45	37.71	42.83	103.40
Media aritmética	26.30	64.11	56.63	62.71	71.28	39.01	45.39	108.73
Tercer Cuartil (75%)	33.61	81.53	75.83	69.89	79.07	44.71	54.24	125.41
Máximo	56.64	141.37	133.65	102.10	108.10	70.00	85.10	190.30
	Línea 7			Línea 2				
	23-may-18	07-nov-18	25-feb-19	08-nov-17	25-abr-18	31-oct-18	08-may-19	
Mínimo	9.10	2.34	25.60	14.66	13.38	47.06	36.87	
Primer Cuartil (25%)	20.96	12.05	35.10	34.31	44.34	80.99	80.37	
Mediana	23.97	24.25	38.59	40.98	60.81	92.39	98.57	
Media aritmética	26.32	25.93	40.24	44.81	63.85	95.44	100.46	
Tercer Cuartil (75%)	28.45	33.16	42.90	51.04	78.20	104.22	116.33	
Máximo	40.10	65.51	54.94	77.45	140.70	141.81	171.30	

**Tabla 18.** Estadísticos de las líneas monitoreadas por horario y temporada.

Estadístico	Campañas de muestreo por horario y temporada															
	Temporada seca fría															
	Horario Mañana						Horario Tarde									
	Línea 1						Línea 1									
	25-oct-17	24-oct-18	11-feb-19	15-feb-19	19-feb-19	21-feb-19	25-oct-17	24-oct-18	11-feb-19	15-feb-19	19-feb-19	21-feb-19				
Mínimo	21.68	27.50	51.29	53.29	16.64	6.91	2.20	7.92	27.35	30.65	9.21	4.97				
Primer Cuartil (25%)	96.62	57.29	74.05	82.28	70.40	29.52	17.31	37.30	48.72	57.80	31.29	32.66				
Mediana	170.53	74.51	85.11	101.09	95.22	51.55	24.46	53.73	58.14	67.45	37.71	42.83				
Media aritmética	224.52	75.93	89.69	112.93	108.08	66.81	26.30	56.63	62.71	71.28	39.01	45.39				
Tercer Cuartil (75%)	329.66	93.47	103.86	140.17	133.66	98.45	33.61	75.83	69.89	79.07	44.71	54.24				
Máximos	690.30	151.59	153.00	223.50	230.52	200.10	56.64	133.65	102.10	108.10	70.00	85.10				
	Línea 7		Línea 2								Línea 7		Línea 2			
	07-nov-18	25-feb-19	08-nov-17	31-oct-18							07-nov-18	25-feb-19	08-nov-17	31-oct-18		
Mínimo	32.94	21.82	22.26	152.60							2.34	25.60	14.66	47.06		
Primer Cuartil (25%)	49.47	32.72	67.97	219.70							12.05	35.10	34.31	80.99		
Mediana	55.94	41.70	77.74	241.80							24.25	38.59	40.98	92.39		
Media aritmética	57.92	42.22	78.43	271.50							25.93	40.24	44.81	95.44		
Tercer Cuartil (75%)	63.51	49.90	91.13	306.20							33.16	42.90	51.04	104.22		
Máximos	87.60	77.80	136.50	440.20							65.51	54.94	77.45	141.81		
	Temporada seca caliente															
	Horario Mañana						Horario Tarde									
	Línea 1		Línea 7	Línea 2								Línea 1		Línea 7	Línea 2	
	18-abr-18	03-abr-19	23-may-18	25-abr-18	08-may-19							18-abr-18	03-abr-19	23-may-18	25-abr-18	08-may-19
Mínimo	41.75	58.02	39.52	108.10	84.73							17.49	54.50	9.10	13.38	36.87
Primer Cuartil (25%)	76.00	137.07	48.95	154.80	143.81							38.76	86.25	20.96	44.34	80.37
Mediana	84.80	151.37	69.78	168.80	166.26							54.63	103.40	23.97	60.81	98.57
Media aritmética	85.36	153.90	66.12	171.50	165.56							64.11	108.73	26.32	63.85	100.46
Tercer Cuartil (75%)	93.37	167.07	78.57	184.10	188.88							81.53	125.41	28.45	78.20	116.33
Máximos	135.41	220.52	120.34	231.50	260.32							141.37	190.30	40.10	140.70	171.30