



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PERFIL ESPACIAL DE AEROPARTÍCULAS CARACTERIZADAS POR DIÁMETRO AERODINÁMICO EN UNA AVENIDA

Tesis

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA:

René Rensoli Samayoa

Tutor

Dr. Arón Jazcilevich Diamant

CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR

- Dr. Arón Jazcilevich Diamant
- Dr. Ricardo Torres Jardón
- Dra. Irma Aurora Rosas Pérez

CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD MX, ENERO, 2021



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

Perfil espacial de aeropartículas caracterizadas por diámetro aerodinámico en una avenida.

Posgrado en Ciencias de la Tierra

Campo 5. Ciencias Atmosféricas, Espaciales y Planetarias

Estudiante: René Rensoli-Samayoa

rrensoli@comunidad.unam.mx

Tutor: Dr. Arón Jazcilevich Diamant

jazcilev@unam.mx

Jurado de grado asignado

- | | |
|--|--------------|
| ▪ Dra. Irma Aurora Rosas Pérez | ▪ Presidente |
| ▪ Dra. Ofelia Morton Bermea | ▪ Vocal |
| ▪ Dr. Arón Jazcilevich Diamant | ▪ Secretario |
| ▪ Dr. Iván Yassmany Hernández Paniagua | ▪ Suplente |
| ▪ Dr. Rodrigo Morales Cueto | ▪ Suplente |

Centro de Ciencias de la Atmósfera

Universidad Nacional Autónoma de México

Contenido

Perfil espacial de aeropartículas caracterizadas por diámetro aerodinámico en una avenida.....	2
0. Agradecimientos	6
1. Resumen	7
2. Marco Teórico	8
2.1 Las aeropartículas	8
2.2 El material particulado en la Ciudad de México	11
2.3 El efecto cañón urbano	12
3. Proyecto	13
3.1 Conceptos y definiciones	13
3.2 Planteamiento del problema	14
3.3 Objetivos	14
Objetivo general.....	14
Objetivos particulares	14
3.4 Hipótesis.....	14
4. Antecedentes	15
5. Método	16
5.1 Método e instrumentos	16
5.2 A Anemómetro ultrasónico Young 81000V	16
5.2B Medidor portátil de PM _{2.5} Thermo PDR-1500.....	17
5.2C Espectrómetro portátil de aerosoles Grimm 11-C.....	17
5.2D. Concentrador de datos CR1000 de Campbell.....	18
5.2E Sidewalk Atmospheric Profiler (SWAP).....	18
5.3 Diagrama general	19
5.4 Calibración y programación de equipos	20
5.4A Anemómetro ultrasónico Young 81000V	20
5.4B Medidor portátil de PM _{2.5} Thermo PDR-1500.....	21
5.4C Espectrómetro portátil de aerosoles Grimm 11-C.....	22
5.4D Concentrador de datos CR1000 de Campbell.....	23
5.4E Sidewalk Atmospheric Profiler (SWAP).....	24
5.5 Marcos de referencia y discretización del eje Z.....	25
5.6 Filtro de señales local y de fondo.....	27
5.7 Otras consideraciones.....	27
5.8 Sitio de muestreo	28
6. Trabajo en campo	29
7. Resultados y análisis	30

7.1 Masa de PM _{2.5}	30
7.2 Perfil espacial de PM _{2.5}	31
7.3 Conteo de partículas	31
7.4 Total de partículas por cada diámetro	33
7.5 Distribución horizontal del número de partículas	34
7.6 Distribución vertical del número de partículas.....	35
7.7 Distribución por tamaño de partícula	35
7.8 Perfil espacial de aeropartículas	37
7.9 Distribución por penetración en vías respiratorias.....	38
7.10 Perfil espacial de partículas respirables.....	39
8. Análisis general	40
9. Conclusiones	40
10. Referencias.....	41
11. Anexo I. Perfil espacial de conteo promedio de aeropartículas	42

0. Agradecimientos

Al apreciable comité tutorial y jurado de grado: Dr. Arón Jazcilevich Diamant, Dr. Ricardo Torres Jardón, Dra. Irma Aurora Rosas Pérez, Dr. Ivan Yassmany Hernández Paniagua, Dra. Ofelia Morton Bermea, Dr. Rodrigo Morales Cueto.

A Ing. Joaquín Olivera, Ing. Manuel García, Ing. Wilfrido Gutiérrez, Ing. Alfredo Rodríguez, Ing. José Manuel Hernández por su apoyo técnico y su atención amable y profesional.

A mis compañeros Ana Karen Portilla, Arturo Montero, Aurora Armendariz, Juan de la Cruz, Lourdes Mejía por todo su apoyo.

A Mónica, Francisco, Marcelo, José, Marco, Galdino y todo el personal del CCA por prestar sus manos a este proyecto.

Al proyecto CM-SECITI/063/2018, el Programa Nacional de Posgrados de Calidad del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, las becas de Apoyo para Titulación y Obtención de Grado mediante un Fondo Especial de Ingresos Extraordinarios.

Al Centro de Ciencias de la Atmósfera, Posgrado en Ciencias de la Tierra y la Universidad Nacional Autónoma de México.

“Por mi raza hablará el espíritu.”

1. Resumen

Se estudió el diámetro de aeropartículas muestreadas en un plano ortogonal al flujo vehicular ~~sitio~~ junto a una avenida. Para ello se montaron espectrómetros de aerosoles en un dispositivo electromecánico móvil estacionado en la acera. El dispositivo se acercaba y alejaba periódicamente del flujo vehicular tomando muestras a determinadas distancias y alturas para obtener la distribución de las aeropartículas. Empleando un algoritmo matemático, se identificó la emisión directa de los vehículos, separándola de la concentración de fondo.

Se obtuvieron perfiles de concentración en el plano ortogonal para aeropartículas de 0.22 μm a 2.5 μm , potencialmente tóxicas por su capacidad de penetración en el organismo. La máxima concentración de aeropartículas finas se localizó a una altura entre 1.14 y 1.43 m, lo que representa un mayor riesgo para la población infantil y a una distancia de 1.75m del borde de la carretera. Al conocerse objetivamente el fenómeno de exposición junto a un camino urbano, los resultados contribuyen en el diseño de medidas que mitiguen la exposición a las aeropartículas y sus riesgos.

El método se puede replicar en otros sitios. Los resultados pueden contribuir en el diseño y desarrollo de zonas ambientales limpias.

2. Marco Teórico

2.1 Las aeropartículas

Los aerosoles se definen como la mezcla heterogénea formada por partículas sólidas o líquidas suspendidas en un medio gaseoso, comúnmente aire. El tamaño de estas partículas va desde $0.002 \mu\text{m}$ a $100 \mu\text{m}$ (Aladro, 2012). Además de los contaminantes gaseosos, en el ambiente abundan partículas microscópicas sólidas o líquidas suspendidas en el aire en forma de aerosol, a las que denominamos aeropartículas. Su origen es diverso, pueden provenir de diversas fuentes naturales o antropogénicas como tierra, polen, bacterias, toxinas, erosión, emisiones volcánicas, diversos procesos industriales y quema de biomasa o combustibles para vehículos, cocina o generación de energía, etc, (Hinds, 1982) (Lippmann, 2000).

La Figura 2.1 resume las ideas principales de este tema.

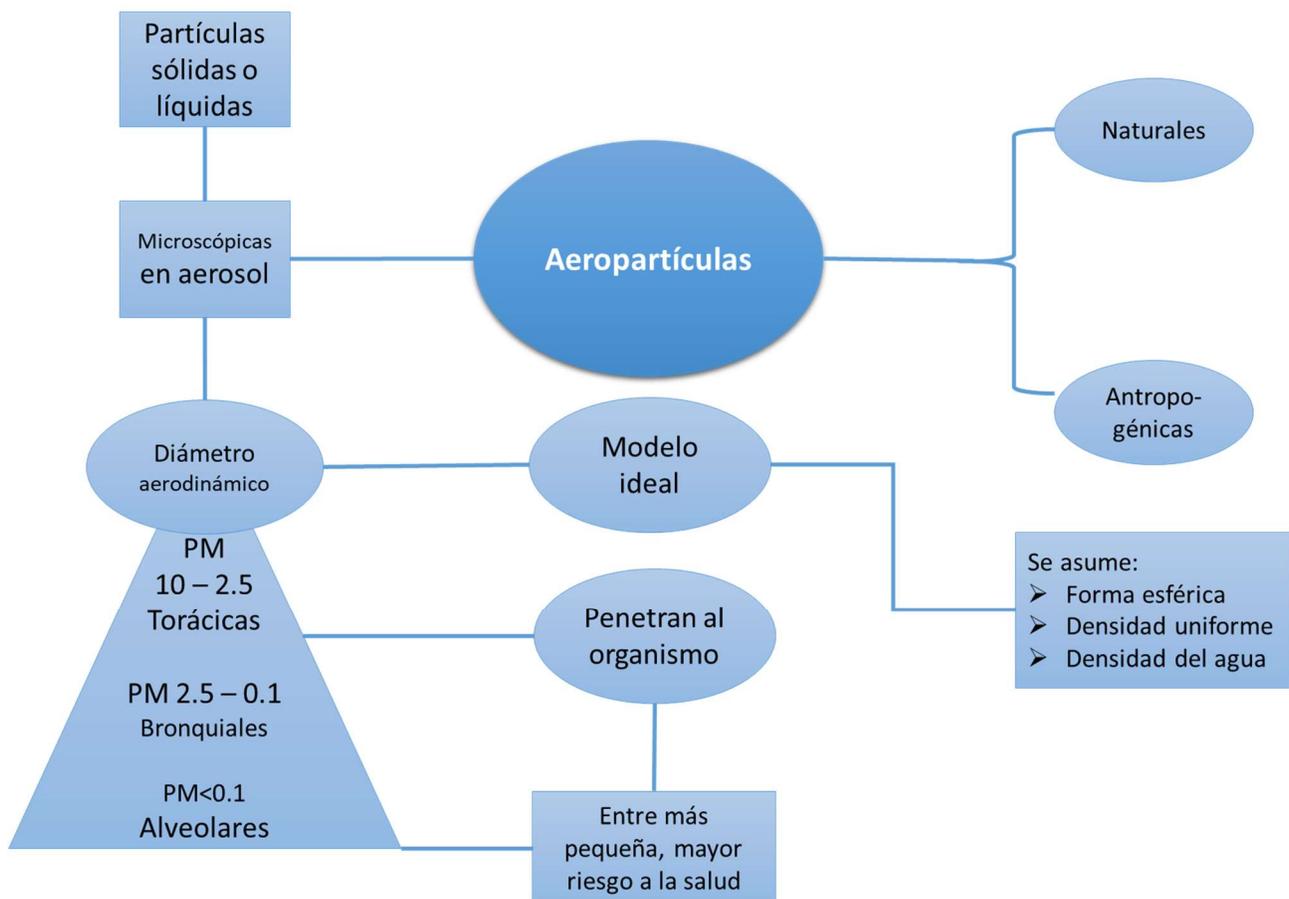


Figura 2.1 Mapa mental sobre aeropartículas, Resume el capítulo 2.1 y conecta las ideas clave sobre teoría de aeropartículas (Rojas y Garibay, 2003) (WHO, 2002) (NOM-025-SSA1-2014).

En la atmósfera baja hay partículas primarias (emitidas directamente de fuentes) y secundarias (producidas a partir de precursores mediante un proceso llamado nucleación) (Pitts y Pitts, 2000).

Las aeropartículas tienen forma y dimensiones erráticas e indefinidas, así como una composición variable. Para su estudio, las aeropartículas se caracterizan por su diámetro aerodinámico, pues éste se relaciona con su comportamiento físico, su distribución y prevalencia en la atmósfera, así como su posible repercusión a la salud. El diámetro aerodinámico se define como la longitud teórica que tendría una partícula considerando idealmente que ésta fuera esférica y tuviera una densidad uniforme y unitaria (1g/cm^3). Si bien las partículas reales son irregulares e imperfectas, caracterizarlas por su diámetro aerodinámico resulta conveniente para su estudio y regulación (Figura 2.1) (Pitts y Pitts, 2000) (Seinfeld, 1998) (NOM-025-SSA1-2014) .

Su tamaño varía desde $0.002\ \mu\text{m}$ hasta $100\ \mu\text{m}$ de diámetro aerodinámico (desde unos cuantos átomos hasta el grosor del cabello humano). Además de su toxicidad, el peligro de estas aeropartículas está dado por su tamaño: entre más pequeñas sean, tienen mayores probabilidades de penetrar al organismo. (Figura 2.1) (WHO, 2002) (NOM-025-SSA1-2014)

La clasificación más común de aeropartículas es la siguiente:

- PST partículas suspendidas totales hasta $100\ \mu\text{m}$ de diámetro, o bien, todas las partículas que son captables en un filtro determinado.
- PM_{10} menores o iguales a $10\ \mu\text{m}$. Pueden depositarse en la región extratorácica del tracto respiratorio (nariz, boca, naso, oro y laringofarínge)
- $\text{PM}_{2.5}$ menores o iguales a 2.5 micras. Están formadas primordialmente por gases y por material proveniente de la combustión, una gran proporción de esta fracción, son secundarias. Se depositan fundamentalmente en la región traqueobronquial (tráquea hasta bronquiolo terminal), aunque pueden ingresar a los alveolos.
- $\text{PM}_{0.1}$ menores o iguales a $0.1\ \mu\text{m}$. Estas partículas ultrafinas son generadas directamente por combustión y actividad fotoquímica. Se depositan mayoritariamente en la región alveolar, incrementando la posibilidad de atravesar la membrana alvéolo capilar hacia el torrente sanguíneo y migrar hacia otros órganos.

Por su concentración en la atmósfera, se observan cuatro módulos de aeropartículas con rangos de tamaño característicos (Pitts y Pitts, 2000):

- Partículas ultrafinas ($D < 10^{-8}\ \text{m}$),
- Núcleos Aitken ($D \approx 10^{-8}\ \text{m}$),
- Rango de acumulación ($D \approx 10^{-7}\ \text{m}$)
- De origen mecánico ($D > 10^{-6}\ \text{m}$),

La Figura 2.2 explica los procesos principales que generan las aeropartículas e ilustra los cuatro módulos anteriores.

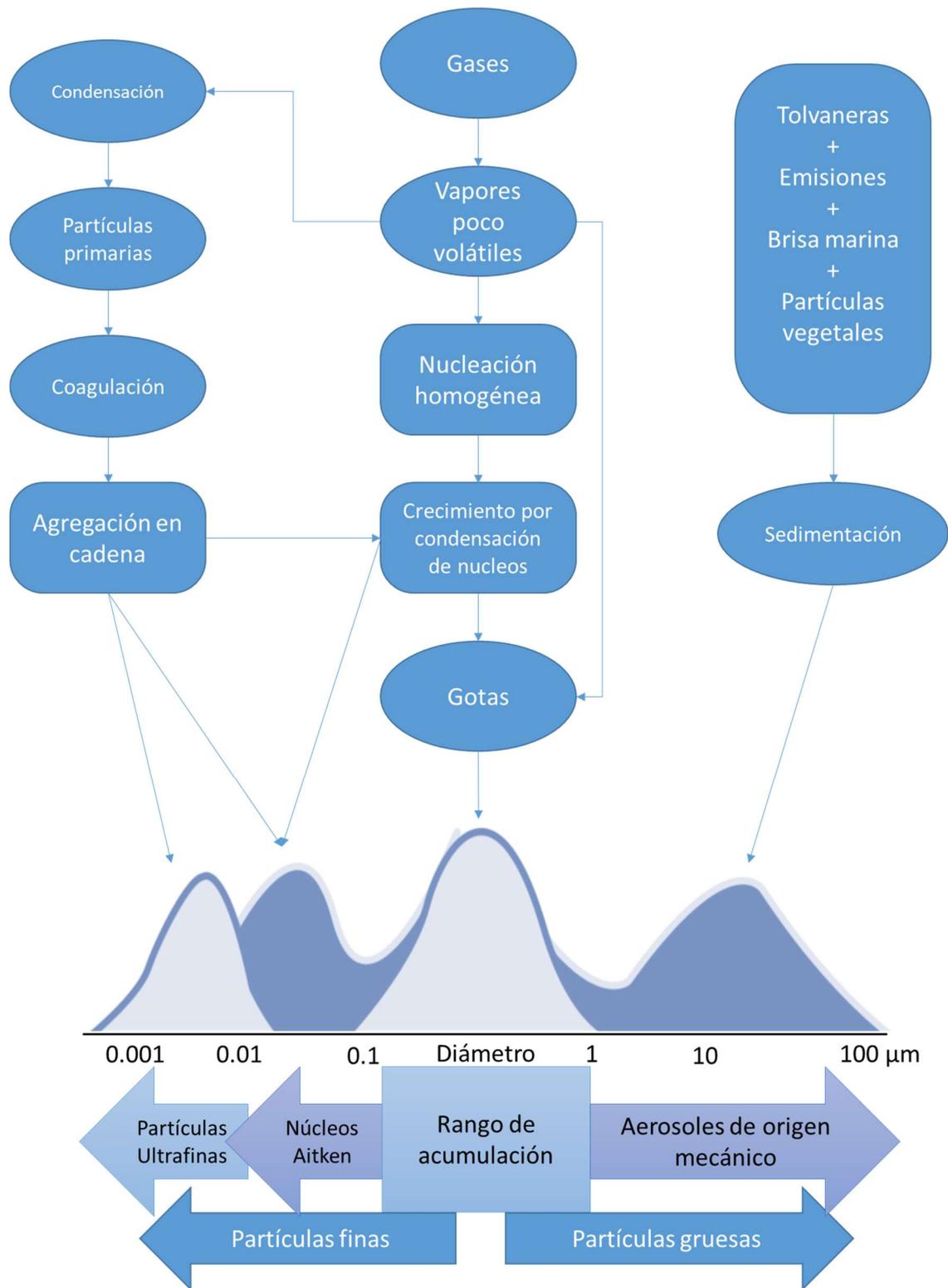


Figura 2.2 Diagrama que resume los orígenes, procesos de producción y transformación de aeropartículas. La parte inferior muestra los cuatro módulos de aeropartículas y sus tamaños aproximados en micras. Adaptado de Figura 9.7 Pitts y Pitts, 2000.

2.2 El material particulado en la Ciudad de México

Las aeropartículas contaminantes representan el principal problema de salud pública, sus efectos dependen de la concentración, composición química y su tamaño representado como diámetro aerodinámico. Estos contaminantes son regulados por la NOM-025-SSA1-2014 que establece los límites permisibles para el material particulado de hasta 10µm (PM₁₀) y de hasta 2.5 µm (PM_{2.5}) (SEDEMA, 2016).

Tabla 2.2. Resumen de las emisiones móviles (vehiculares) de PM₁₀ y PM_{2.5} en la Ciudad de México en 2016. Datos del Inventario de Emisiones 2016, Tabla 3 y Tabla 4 (SEDEMA, 2016).

Emisiones contaminante	por Fuentes móviles (Toneladas)	Fuentes móviles (Porcentual)	Emisión anual (Toneladas 100%)
PM₁₀	5,642	52.5%	10,745
PM_{2.5}	2,864	55.7%	5,142

El material particulado proviene de diversas fuentes tanto naturales (tierra, polen, incendios, etc.) como antrópicas (industria, automóviles, quema de biomasa, etc.) (Figura 2.1). Como apreciamos en la Tabla 2.2, en el año 2016, en la Ciudad de México se emitieron en total 10,745 toneladas de PM₁₀ de las cuales 5,142 toneladas corresponden a PM_{2.5}. De estas emisiones, 5,642 toneladas de PM₁₀ (52.5% del PM₁₀ total) y 2,864 toneladas de PM_{2.5} (55.7% del PM_{2.5} total) corresponden a fuentes móviles, donde tractocamiones, autobuses, vehículos de carga y automóviles representan las contribuciones mayoritarias de partículas finas (SEDEMA, 2016).

Las partículas generadas mediante procesos de combustión (como automóviles, generadores de energía y quema de biomasa) pueden medir desde algunos nanómetros hasta micrómetros. Las partículas de polvo, polen, fragmentos vegetales y sal de mar suelen ser mayores a un micrómetro. El material producido por procesos fotoquímicos en la atmósfera, se encuentra principalmente como partículas menores a un micrómetro. El tamaño de estas partículas afecta tanto su tiempo de vida en la atmósfera como sus propiedades físicas y químicas (Seinfeld, 1998).

2.3 El efecto cañón urbano

El cañón urbano ha sido adoptado como la unidad estructural básica de análisis en muchas investigaciones sobre el clima urbano y contaminación. Se le define como un canal rectangular que se extiende longitudinalmente en la dirección de una calle delimitada por edificios. Su símil con el cañón geográfico es notable ya que este mismo designa un valle o una garganta profunda entre dos laderas más o menos altas y escarpadas (Lipp, 2014).

Como muestra la Figura 2.3, un cañón urbano se define por tres parámetros principales: (H) altura máxima, (W) ancho y (L) longitud. Así mismo, se describen sus proporciones empleando los coeficientes entre estos parámetros (H/W o L/H) junto con la proporción superficial denominada densidad edificada $j=Ar/AI$ (área plana/área edificada). Otros factores a considerar son la orientación (θ) (respecto a los ejes N-S y E-O) y el factor de visibilidad de cielo (SVF) que describe la porción del cielo visible desde una superficie dada (Lipp, 2014).

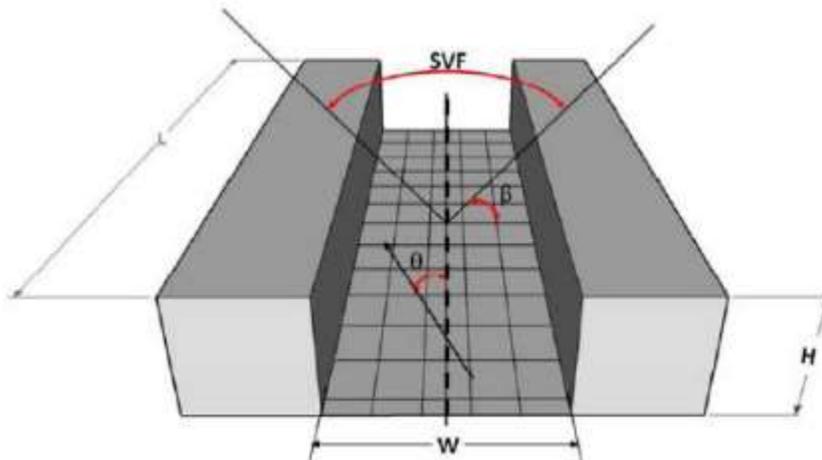


Figura 2.3. Esquema de un cañón urbano donde se muestran sus parámetros (H, W, L, θ) y el factor de visibilidad (SVF que depende del ángulo β). Fuentes: Erell, 2011 y Cabras et al., 2014.

Los cañones urbanos modifican en mayor medida las variables climatológicas, la dirección de los vientos reinantes, la temperatura propia del aire, generándose microclimas que influyen en las actividades que se realizan en el exterior, lugar donde los usuarios comparten los espacios públicos, mismos que en diversos conjuntos habitacionales han sido modificados o anulados. Comúnmente se da el fenómeno de elevación de temperatura en zonas urbanas densamente construidas y la falta de espacios verdes, dando lugar al fenómeno de islas de calor urbano. (Zavala et al., 2019) (Izaguirre, 2014)

3. Proyecto

3.1 Conceptos y definiciones

En el presente proyecto se muestrearon aeropartículas en un plano cercano a una avenida a campo abierto, con vegetación en los alrededores. La Figura 3.1 representa el sitio de muestreo y el plano obtenido.

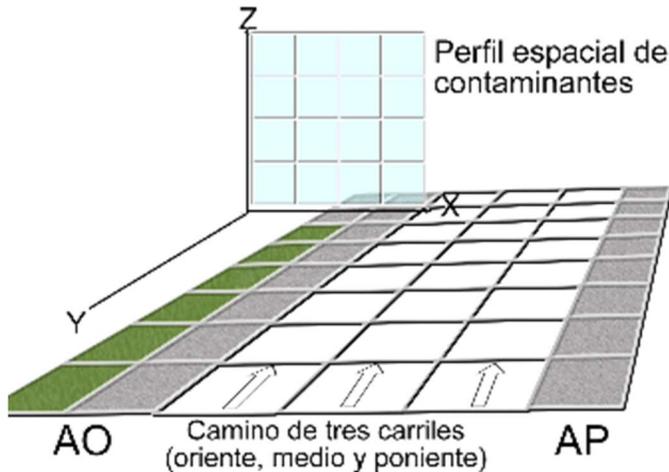


Figura 3.1 A. Diagrama que representa el sitio de muestreo y el perfil espacial de contaminantes que obtuvo del trabajo en campo.

Figura 3.1 B Mismo diagrama empalmado sobre el sitio de muestreo (Ver 5.8 Sitio de Muestreo).

En las Figuras 3.1 A y 3.1B se ubican los siguientes elementos en el espacio tridimensional (X, Y, Z).

- **Perfil espacial de contaminantes** = plano vertical (X, Z) ortogonal al camino (Y) donde se reporta experimentalmente la distribución espacial de la concentración medida de los contaminantes muestreados. (Ver 5 Método y 6. Resultados)
- **El camino** = plano horizontal (X, Y) sobre el que pasa la avenida, con tres carriles donde pasa el flujo vehicular en dirección Y, sentido de norte a sur.
- **Acera** = superficie pavimentada que delimita un camino.
- **AO** = Acera oriente, sobre la que se midieron los contaminantes estudiados.
- **AP** = Acera poniente.

3.2 Planteamiento del problema

En un sitio junto a una avenida a campo abierto, ¿a qué altura y distancia se encuentra la concentración máxima de aeropartículas y cuál es el tamaño de éstas?

3.3 Objetivos

Objetivo general

Obtener, al lado de una avenida, el perfil espacial de aeropartículas caracterizadas por su diámetro aerodinámico (0.25 a 2.5 micras).

Objetivos particulares

- ✓ Analizar la distribución espacial de aeropartículas por diámetro aerodinámico en la acera.
- ✓ Identificar, dentro de este perfil espacial, las zonas de mayor concentración de partículas finas.
- ✓ Sentar las bases metódicas para ubicar zonas de aeropartículas.
- ✓ Contribuir en ciencia básica a la comprensión de la exposición personal a aeropartículas.

3.4 Hipótesis

Las aeropartículas se acumulan en diferentes puntos dependiendo de su tamaño. A mayor cercanía con la emisión vehicular y a menor altura, aumenta la concentración de partículas finas.

4. Antecedentes

En este trabajo se estudió por primera vez cómo se distribuye espacialmente el diámetro de aeropartículas vehiculares en un punto junto a una avenida. El análisis de diámetro de aeropartículas brinda información sobre su posible impacto a la salud, pues permite identificar las aeropartículas que podrían penetrar vías torácicas, bronquiales o alveolares (WHO, 2002) (NOM-025-SSA1-2014).

Zavala modeló computacionalmente la exposición humana a contaminantes en un cañón urbano. Halló que la exposición es proporcional al tiempo de residencia del individuo. Esto denota la importancia de estudiar contaminantes en escala de segundos (Zavala et al., 2019).

Erazo usó por primera vez el sistema Perfilador Atmosférico Cercano a la superficie (PACS) y encontró que el $PM_{2.5}$ se acumula preferencialmente entre 1.1 m y 1.4 m de altura, lo que puede representar una exposición de mayor riesgo para niños. También encontró un segundo máximo de $PM_{2.5}$ entre 1.8 m y 2.2 mm de altura, ambos a 0.2 m de distancia al arroyo vehicular (Erazo, 2016).

La escala meteorológica “micro escala δ ” toma mediciones en segundos y hasta 200 cm de espacio, lo que permite detectar ondas de sonido, turbulencia o, en nuestro caso de interés, concentraciones de aeropartículas a nivel personal (Jorba, 2005).

A diferencia de otros trabajos que evalúan la calidad del aire por encima de los 10 m de altura tomando promedios de 8 o 24 hr de muestreo, en este proyecto se estudió en escala de centímetros y segundos, lo que permitió ubicar las concentraciones máximas.

Aplicando un algoritmo matemático sobre datos experimentales, Jazcilevich et al. separó la emisión de partículas y la concentración de fondo. Este método fue replicado en el presente trabajo para reportar la emisión vehicular en los resultados (Jazcilevich et al., 2018).

Empleando el sistema PACS, el presente proyecto estudió el tamaño de aeropartículas por emisiones vehiculares. Para ello se empleó el siguiente método y los siguientes instrumentos.

5. Método

5.1 Método e instrumentos

Para obtener la concentración y diámetro de aeropartículas se emplearon los siguientes dispositivos:

- ❖ Espectrómetro portátil de aerosoles Grimm 11-C.
- ❖ Medidor portátil de PM_{2.5} pDR de Thermo.
- ❖ Anemómetro sónico (Viento y temperatura) UV81000 de Young.
- ❖ Concentrador de datos Datalogger CR1000 de Campbell.
- ❖ Programador accesorio CR1000RK de Campbell para visualizar y trabajar los datos.

Análoga a la investigación de Erazo, estos dispositivos se acoplaron en el perfilador atmosférico PACS, un brazo mecánico en movimiento que se acercaba y alejaba periódicamente del paso vehicular recolectando las muestras de aire que se analizaron en los dispositivos ya mencionados y que a continuación se detallan.

5.2A Anemómetro ultrasónico Young 81000V

Mediante sensores sónicos, este instrumento mide dirección y velocidad del viento que reporta en coordenadas cartesianas y polares.

También calcula temperatura sónica en función de variaciones en la velocidad del sonido.

Se orienta manualmente tomando como referencia el norte geográfico, ubicado vía GPS.

En esta campaña se montó directamente sobre la plataforma móvil del SWAP.



Figura 5.2A Anemómetro ultrasónico Young 81000V

5.2B Medidor portátil de PM_{2.5} Thermo PDR-1500



Figura 5.2B Medidor portátil de PM_{2.5} Thermo PDR-1500

Detecta partículas de 0.1 a 10 micrómetros.

Mide el esparcimiento de un haz infrarrojo a 0.88 micrómetros, que se ve alterado por la presencia de partículas de tamaño cercano a esta longitud de onda (Nefelometría y teoría de Mie).

Cuenta con tres ciclones accesorios y una bomba de flujo personalizable de 1 a 3.5 LPM. Esto permite configurar el tamaño de partícula que se desee monitorear.

Captura las muestras en un filtro analizable.

5.2C Espectrómetro portátil de aerosoles Grimm 11-C



Figura 5.2D Espectrómetro portátil de aerosoles Grimm 11-C (Optical Particle Counter Portable and Stationary Aerosol Spectrometers Grimm 11-C)

Detecta aeropartículas de 0.22 a 32 micras (μm) y las clasifica por diámetro, reportando un perfil amplio.

Toma muestras de aire continuamente y las analiza mediante un haz rojo visible a 660 nm de intensidad modulada.

Captura las muestras en un filtro analizable.

5.2D. Concentrador de datos CR1000 de Campbell

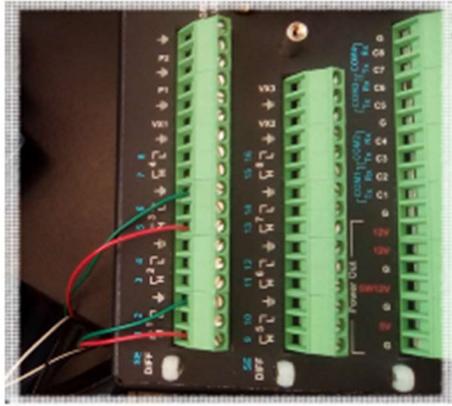


Figura 5.2E Concentrador de datos CR1000 de Campbell

Colecta y almacena datos de equipos compatibles. Se programa en CR-Basic.

Cuenta con las siguientes entradas: contadores de pulso, switch y analógicas, que le permiten comunicarse con diversos equipos.

Como accesorio se empleó el controlador con pantalla CR1000RK para visualizar los datos en tiempo real.

Se empleó para concentrar los datos muestreados por los equipos anteriores y facilitar su análisis.

Equipo original desarrollado en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)

Consiste en un brazo mecánico móvil que se desplaza verticalmente de 0 cm a 1140 mm y horizontalmente de 0 a 1850 mm desde su posición inicial (a 1140 mm sobre el nivel del suelo).

El brazo se desplaza continuamente recolectando muestras. Cuenta con sensores que reportan continuamente su posición vertical y horizontal durante el recorrido.

5.2E Sidewalk Atmospheric Profiler (SWAP)

Perfilador Atmosférico Cercano a Superficie (PACS)



Figura 5.2F Sidewalk Atmospheric Profiler.

5.3 Diagrama general

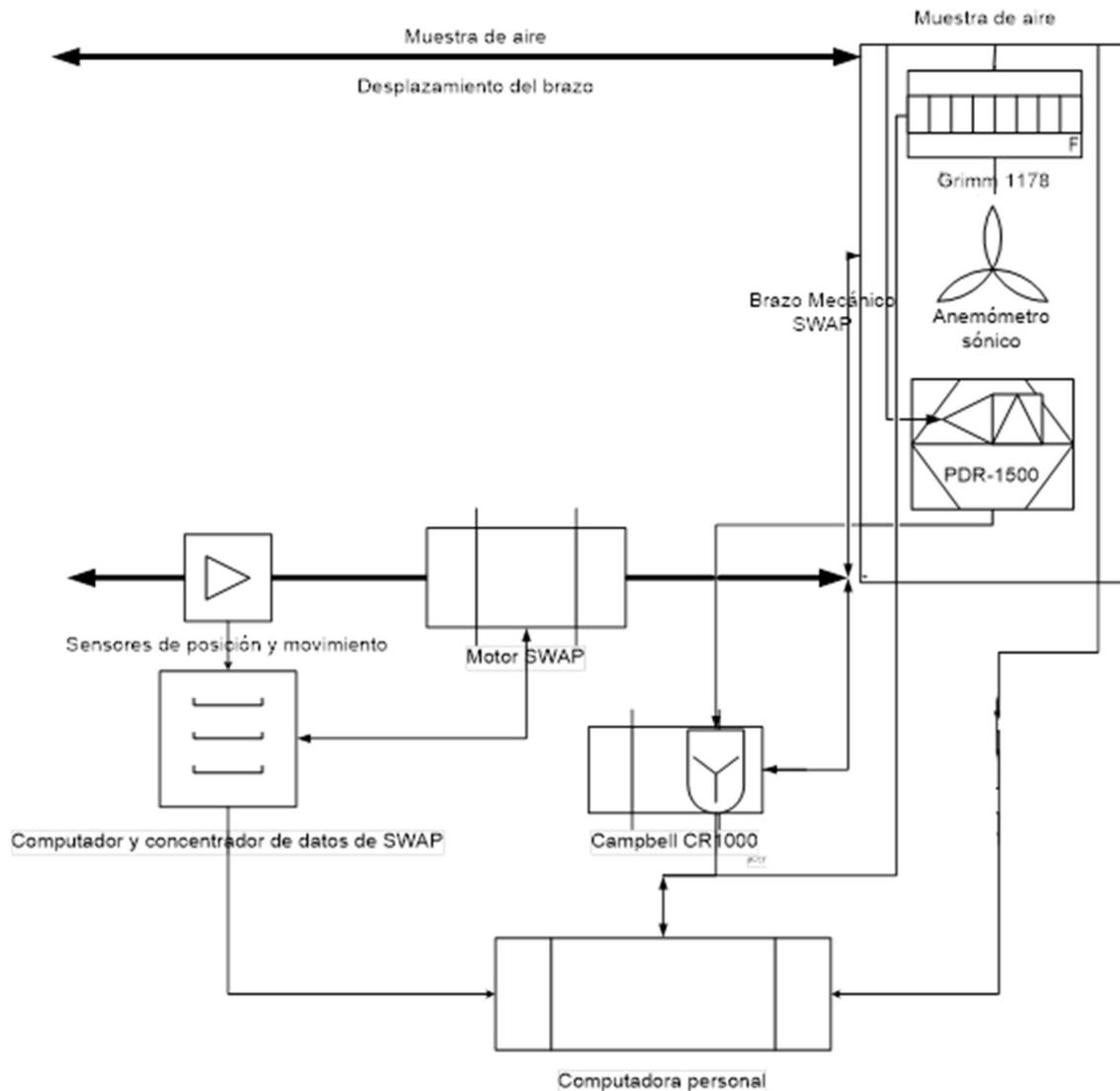


Figura 5.3 Diagrama general de disposición física y conexiones. Los equipos montados sobre el brazo mecánico del SWAP estuvieron sujetos a su mismo movimiento; los demás equipos permanecieron estáticos en el transcurso del experimento.

Para generar el perfil vertical deseado, se midieron datos a diferentes niveles de altura y distancia tomados mediante el movimiento del brazo mecánico del SWAP, donde iban montados los analizadores PDR-1500 de Thermo, anemómetro sónico Young 81000V y espectrómetro Grimm 11-C tomando muestras a los mismos niveles y operando simultáneamente.

5.4 Calibración y programación de equipos

Para su uso en campo, cada equipo de medición fue programado, configurado y calibrado de la siguiente manera:

5.4A Anemómetro ultrasónico Young 81000V

Calibración de fábrica

El Young 81000V cuenta con calibración de fábrica vigente, misma que se constató en laboratorio operando en simultáneo con un anemómetro homólogo idéntico.

Configuración

```
SERIAL OUTPUT FORMAT: CUSTOM
578B [ U,V,W, 3D SPEED AZIMUTH Tz ]
WIND SPEED UNITS: m/s
OUTPUT RATE: 10 Hz
SAMPLES FOR AVERAGE: 0
WAKE CORRECTION: YES
SCALING MULTIPLIER: 10000
ERROR HANDLING: OMIT INVALID DATA
VIN FS CALIBRATIONS: 3885 3882 3878 3881
PRESS ANY KEY TO CONTINUE...
HI SPEED ADC SAMPLES: 5
WS THRESHOLD [cm/s]: 50
ACCESS LEVEL: NORMAL
EEPROM CHKSUM: 615E
```

Figura 5.4A. Captura de pantalla del reporte de configuración del anemómetro sónico Young 81000V.

El Young 81000V se configuró para medir a 10Hz, es decir, reporta 10 mediciones cada segundo. Cada medición es un vector de datos contiene los siguientes componentes: velocidad del viento en tres dimensiones, rapidez de viento, dirección angular, velocidad vertical del viento y temperatura sónica (U, V, W, Θ , Z, T).

Lo anterior con el fin de obtener suficientes datos para construir rosas de los vientos y describir los flujos de viento dominantes, e identificar posibles turbulencias debido al tránsito. Durante el trabajo en campo se debe orientar respecto al polo norte geográfico, ubicado mediante coordenadas GPS.

Comunicación

La comunicación se realizó mediante un puerto RS-232 (para configurar el equipo) además de terminal analógica para la obtención de datos en el concentrador CR-1000 de Campbell.

5.4B Medidor portátil de PM_{2.5} Thermo PDR-1500

Configuración

El PDR-1500 se configuró para medir a su máxima frecuencia 1Hz, es decir, reporta una medición cada segundo.

Como se mencionó anteriormente, el PDR-1500 cuenta con tres ciclones accesorios y una bomba de flujo personalizable de 1 a 3.5 LPM. Esto permite configurar el tamaño de partícula que se desee monitorear desde 0.1 hasta 10 µm.

Para el muestreo de PM_{2.5} se empleó el accesorio de fábrica denominado “ciclón azul”, diseñado para muestrear partículas menores a 2.5 µm y se configuró la bomba para operar a 3.3 LPM, lo que en conjunto consigue muestrear el tamaño de interés.

Calibración

La calibración del PDR-1500 para la medición de PM_{2.5} se constató operándolo en simultáneo con un analizador Beta empleado como patrón. El analizador Beta patrón forma parte de la estación RAMA (Red Automática de Monitoreo Ambiental) en CCA.

Previa a la medición en campo, se calibró el flujo de succión de la bomba del PDR-1500 con ayuda de un gasómetro y cronometrando el volumen de aire. Asimismo, se calibró la medición de aire cero (sin partículas) generado por recirculación mediante otro ciclón accesorio de fábrica diseñado con este propósito.

Ecuación 5.4 B. Factor de ajuste para pDR-1500 comparando con analizador de referencia.

$$\text{Concentración de PM}_{2.5} \text{ Corregida } \left(\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} \right) = \left(\frac{\text{Concentración PM}_{2.5} \text{ no corregida } \left(\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} \right) - 3.8768}{\frac{0.9399 \cdot 1.3451}{0.3804}} \right)$$

Comunicación

La comunicación se realizó mediante los controles del analizador PDR-1500 (para configurar el equipo) además de terminal analógica para la obtención de datos en el concentrador CR-1000 de Campbell. Los datos además fueron respaldados en la memoria interna del equipo y recuperados desde el software de fábrica PDRPort, desde donde es posible también configurar y obtener datos.

5.4C Espectrómetro portátil de aerosoles Grimm 11-C

Configuración

El Grimm 11-C se configuró para medir a su máxima frecuencia 1/6 Hz, es decir, reporta una medición cada seis segundos. Cada medición incluye un vector de datos de partículas con diámetro aerodinámico desde 0.22 hasta 32 micras. La configuración se realizó mediante el software de marca Grimm 1178.

Calibración

De manera casi análoga que con el PDR-1500, la calibración del Grimm 11-C para la medición de aeropartículas se constató operándolo en simultáneo con el mismo analizador Beta empleado como patrón. El analizador Beta forma parte de la estación RAMA (Red Automática de Monitoreo Ambiental) en CCA.

Ecuación 5.4 C. Factor de ajuste para Grimm 11-C comparando con analizador de referencia.

$$\text{Concentración de } PM_{2.5} \text{ Corregida SF } \left(\frac{\mu g}{m^3} \right) = 3.1722(\pm SE) * \text{Concentración } PM_{2.5} \text{ no corregida} - 8.0912(\pm SE)$$

$$\text{Concentración de } PM_{2.5} \text{ Corregida Sc } \left(\frac{\mu g}{m^3} \right) = 5.5856(\pm SE) * \text{Concentración } PM_{2.5} \text{ no corregida} - 9.2229(\pm SE)$$

Comunicación

La comunicación se realizó vía inalámbrica por puerto Bluetooth a través del software de fábrica Grimm 1178, que permite configurar el equipo Grimm 11-C, descargar los datos y realiza algunos análisis predeterminados. Los datos además fueron guardados en una unidad de memoria SD, de donde también es posible recuperarlos y analizarlos.

5.4D Concentrador de datos CR1000 de Campbell

Programación

Como se menciona anteriormente, el concentrador de datos CR1000 de Campbell recolecta y almacena datos de equipos compatibles conectados a sus diversos puertos de entrada (contadores de pulso, switch y analógicas). Para ello se debe desarrollar un programa en lenguaje CR-Basic que permita recabar las señales analógicas o digitales que emiten los equipos conectados (PDR-1500, Young 81000V), interpretarlas conforme a la medición que representan (viento y $PM_{2.5}$) y reportarlas en formato de tabla compatible.

Comunicación

El concentrador de datos cuenta con memoria interna de donde son recuperables los datos. Asimismo, se comunica con una computadora personal conexión vía USB-RS232 y mediante el software Loggernet, que permite visualizar los datos (recopilados mediante programa o en bruto recibidos desde cada puerto), programar puertos de entrada, programar cálculos, entre otras herramientas y utilidades. Como accesorio se empleó el controlador con pantalla CR1000RK para visualizar los datos en tiempo real.

Protocolo de comunicación

Es necesario que todos los equipos conectados al CR1000 se encuentren bajo el mismo protocolo de comunicación. Para ello, se configuraron todos los equipos, incluido el CR1000, para reportar datos de acuerdo con el siguiente protocolo:

- Baud: 38 400
- Bits de datos: 8
- Paridad: ninguna
- Bits de paro: 1

5.4E Sidewalk Atmospheric Profiler (SWAP)

Movimiento mecánico y electrónico del SWAP

La Figura 5.4 F muestra el recorrido del brazo: se desplaza continuamente de cero hasta 1140 mm de altura sobre el eje Z, y sobre el eje X de manera discreta en 0, 350, 700, 1050, 1400 y 1850 mm de longitud. El recorrido dura 00:06:15 para completar un ciclo de ida y regreso.



Figura 5.4F. Trayectoria realizada por el sistema PACS incorporado en el remolque SWAP, que se coloca de manera perpendicular al flujo vehicular en dirección Y, mientras el brazo se desplaza sobre el plano X, Z.

A) A la izquierda el recorrido “de ida” del brazo de su origen a su punto extremo en 3:00 min.

B) A la derecha, el recorrido “de regreso” del brazo de su punto extremo al de origen en 3:15 min.

Configuración

El SWAP está programado para operar a 48 mm/s lo que garantiza la estabilidad y seguridad de los equipos, así como la operación funcional del sistema.

Calibración

El SWAP cuenta con motor y sensores de posición que monitorean continuamente la ubicación instantánea del brazo en coordenadas (X,Z,t). Estos datos se constataron mediante mediciones directas con cronómetro y cinta métrica. Los ejes de coordenadas y marcos de coordenadas se explican en la siguiente Sección 5.5

Comunicación

El SWAP cuenta con concentrador de datos, una pantalla táctil para su operación y visualización de datos marca Felton. Así mismo, los datos (tiempo y coordenadas de posición) se descargan vía USB a una unidad de memoria portátil. Las horas exactas en segundos de inicio y de paro fueron registradas para su sincronización con los demás equipos.

5.5 Marcos de referencia y discretización del eje Z

Una vez posicionado en el sitio de muestreo, se tomó distancia entre el SWAP y el camino con el fin de corregir los ejes de coordenadas y referenciarlos respecto al camino. En la Figura 5.5 A observamos el marco de coordenadas medidas por el SWAP y en la Figura 5.5 B el marco de coordenadas reportadas en los resultados.

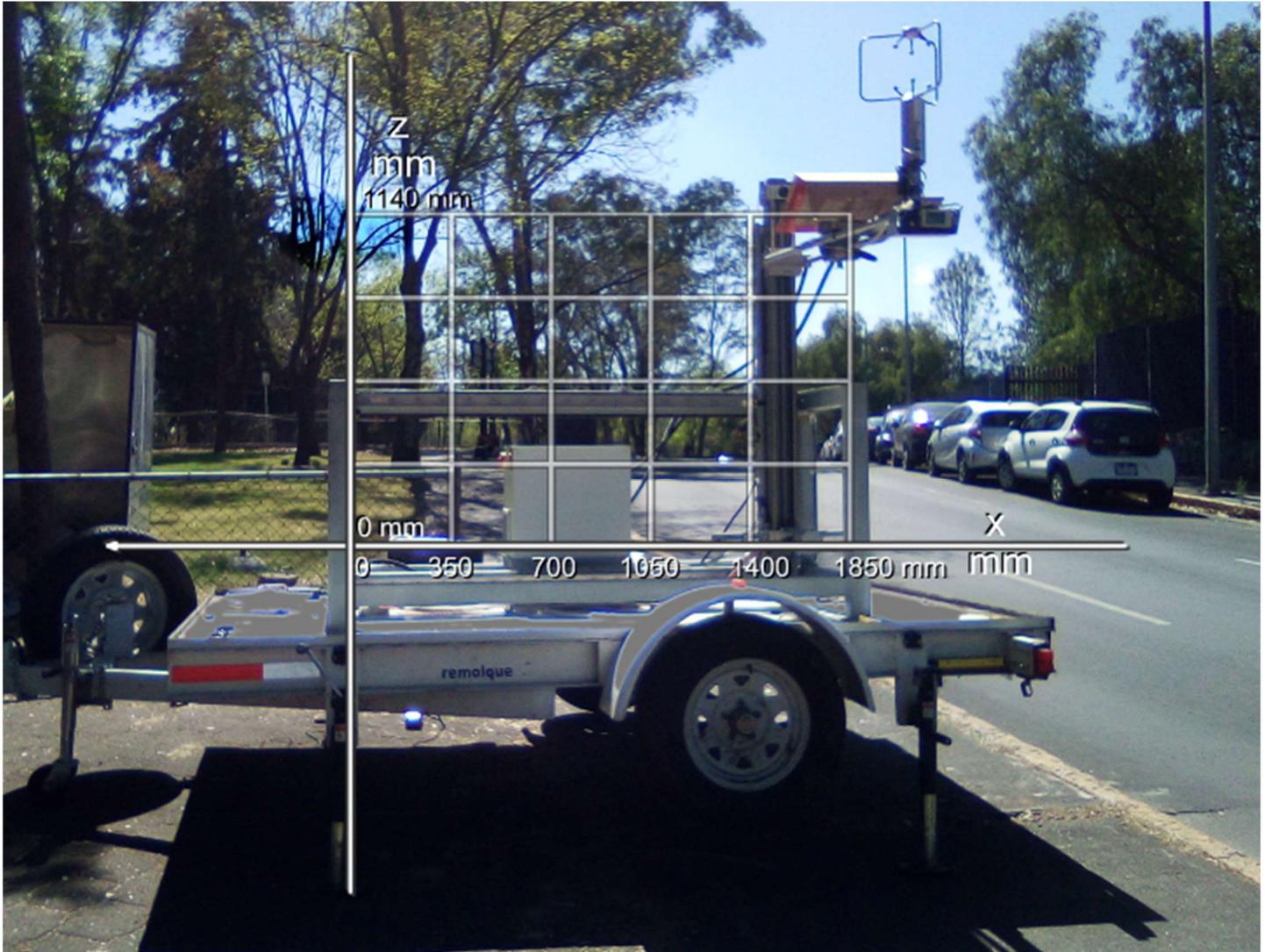


Figura 5.5 A. Vista del SWAP durante su operación en campaña. Sobrepuesto, el plano y ejes de coordenadas X (orientado de Este - Oeste), y Z (altura vertical) medidos.

El origen medido (0, 0) se encuentra donde inicia el recorrido de medición (orientación este y altura mínima). De ahí, el brazo se desplaza ordenada y progresivamente hasta su posición máxima (1850 mm Oeste, 1140 mm de alto), de donde inicia el movimiento de regreso (Ver 5.4F).

Este es el marco de referencia fue corregido y desplazado de la siguiente forma:

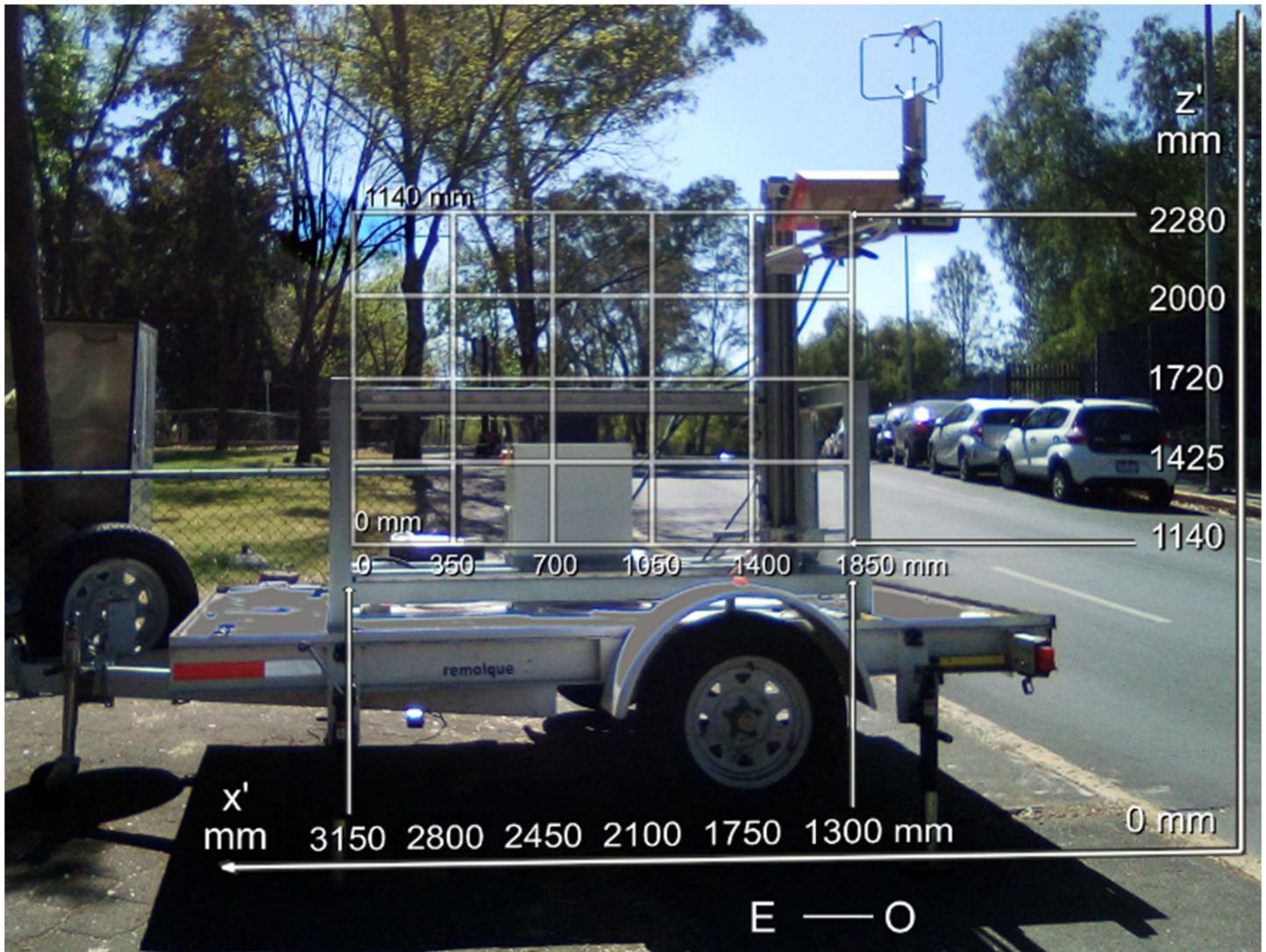


Figura 5.5 B. Marco de referencia con que se reportan los resultados del presente trabajo.

La fotografía fue tomada desde el Norte mirando hacia el Sur. Se observa el plano y ejes de coordenadas corregidos X' (distancia absoluta, orientación de Oeste - Este), y Z' (altura vertical respecto al nivel del suelo).

El origen corregido (0 mm, 0 mm) se encuentra en el límite camino-acera y a nivel del piso. El recorrido de medición inicia en la posición horizontal más alejada del camino y altura mínima ($X = 3150$ mm al Este, $Z = 1140$ mm). De ahí, el brazo se desplaza ordenada y progresivamente hasta su posición horizontal más cercana y altura máxima ($X = 1300$ mm Este, $Z = 2280$ de alto), de donde inicia el movimiento de regreso (Sección 5.4F).

Los datos reportados por el equipo son discretos en X (por movimientos estacionarios) y continuos en Z (por su barrido de alturas). Para efectuar algunos análisis estadísticos se discretizó el eje Z en clases de 285 mm de alto (redondeados con fines ilustrativos en la Figura 5.5B) y éstos se reportan con exactitud en el Capítulo 7 Resultados y Análisis.

5.6 Filtro de señales local y de fondo

En este estudio se identifica la concentración local de emisiones vehiculares, filtrada respecto la concentración de fondo en el ambiente. Para ello se empleó un método con fundamento matemático y fenomenológico que permite distinguir y separar en un análisis de espectro las señales de concentración de fondo respecto a las señales identificables por emisión inmediata (Jazcilevich, 2020). Este análisis está basado en dos consideraciones:

a) La señal de concentración de fondo ocupa un espectro de menor energía, mientras que las señales por emisión inmediata ocupan espectros de mayor energía. Esto debido a que los fenómenos de turbulencia asociados al movimiento vehicular generan torbellinos de mayor rango de frecuencia.

b) La única diferencia entre la concentración registrada por dos sensores cercanos detectando la misma concentración de fondo varía solamente por emisiones en las proximidades.

En nuestro método se cuenta con un mismo sensor que se desplaza a diferentes posiciones. La consideración b se traduce como:

b') Las señales medidas en cierta posición dada (por un sensor que detecta cierta concentración de fondo de manera estable) varían solamente por emisiones puntuales localizadas.

5.7 Otras consideraciones

- ✓ El trabajo en campo se realizó el 17 de febrero de 2020 durante la denominada “temporada de partículas” correspondiente al periodo de noviembre a febrero.
- ✓ Temporada “secas frías”, para prevenir que la humedad o la lluvia alteraran las mediciones reportadas los equipos.
- ✓ Las muestras se tomaron únicamente con las mangueras incluidas desde fábrica en cada equipo para tal fin.
- ✓ El muestreo y el análisis no son simultáneos, sino que presentan un retraso debido al tiempo de residencia en mangueras. Este lapso fue en promedio 3.87 seg para el PDR-1500 con la manguera usada y el flujo configurado.
- ✓ El tiempo de residencia en mangueras no pudo ser medido experimentalmente para el Grimm 11-C debido a que su operación a 1 dato cada 6 seg daba una incertidumbre total de 12 seg. En su lugar, se tomaron como referencia datos máximos captados simultáneamente por ambos analizadores.
- ✓ Se operaron los analizadores en el punto más cercano posible a la toma de muestra, equilibrando estabilidad del brazo mecánico del SWAP (soporta carga hasta 7kg) y evitando caída de presión de la toma de muestra. También se aligeró la carga con cables alimentadores y eliminadores de batería.

5.8 Sitio de muestreo

El trabajo en campo se realizó en el cruce siguiente (Figuras 5A, 5B y 5C) dentro del Circuito de Investigación Científica en Ciudad Universitaria, en donde se han realizado previamente trabajos de medición en campo de contaminantes sentando antecedentes como puntos de referencia o comparación junto con experiencia. A continuación se muestran sus características de este sitio.



Figura 5.8 A. Ubicación satelital de sitio de muestreo y de la estación meteorológica y de calidad del aire del CCA, UNAM. En esta vista se aprecian cruces peatonales y carriles de circulación vehicular. El sitio cuenta con edificios y áreas verdes (Imagen cortesía de Mtra. Bertha Mar Morales, CCA).



Figura 5.8 B. Un paso peatonal con semáforos próximo al sitio de muestreo.



Figura 5.8 C. La circulación de vehículos a gasolina y a diésel trascurre a escasos metros de los peatones.

6. Trabajo en campo

6.1 Preparación

Como preparación previa a la campaña de medición en campo, se realizaron pruebas piloto en el jardín y los laboratorios del CCA. Estas actividades incluían programación, pruebas mecánicas y eléctricas, calibración y constatación de la correcta operación de los analizadores (ver sección 5.4).

Se realizaron adaptaciones mecánicas al brazo del SWAP con el objetivo de lograr un movimiento estable (no brusco ni forzado), el equilibrio y estabilidad de los analizadores sin perjudicar su operación (por ejemplo, al usar las mangueras apropiadas antiestáticas, sin codos ni dobleces y sin prolongaciones, se evitaron caídas de presión). Estas adaptaciones conciernen la distribución física de los analizadores, el montaje de equipo, el desplazamiento del brazo mecánico, el arnés de cableado y organizador de tubos de muestreo.

También se desarrollaron programas para la obtención y concentración de datos de los equipos que lo requerían. En la Figura 5.3 se explica el arreglo obtenido que cumplió estos requisitos y que se implementó en el trabajo en campo.

6.2 Campaña

El trabajo en campo se realizó un mes antes que comenzara la cuarentena de COVID19, el lunes 17 de febrero de 2020, que corresponde al inicio de la cuarta semana de clases en la UNAM, por lo que las mediciones realizadas se consideran representativas del tránsito y actividades diarias de ese periodo.

El SWAP fue remolcado desde el patio del CCA hasta el sitio de muestreo (ver sección 5.8) donde se posicionó en la acera y fue anivelado respecto al plano horizontal compensando la inclinación del terreno (Figura 5.5 A y 5.5 B), orientado de manera perpendicular al camino (ver Figura 3.1), y se le instalaron los analizadores.

Se tomaron datos de muestreo de las 13:30 a las 16:30 CDT con resolución de segundos. En cada medición se tomaron los siguientes datos.

- 1) Concentración de aeropartículas expresadas en:
 - a) cantidad de partículas en un litro de aire (N/L) y
 - b) microgramos en metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
- 2) distancia del brazo PACS al camino y su altura en milímetros (mm)
- 3) Velocidad y dirección del viento (U,V,W en m/s), humedad relativa (%RH) y temperatura ($^{\circ}\text{C}$).

7. Resultados y análisis

7.1 Masa de PM_{2.5}

En la Figura 7.1 se observa la línea del tiempo del muestreo, aislando la señal local de la total (suma de local más fondo) mediante el algoritmo descrito en la sección 5.6. Los valores negativos se deben a retrasos en la medición durante la operación de los analizadores. Destacan varios picos que corresponden al paso específicos de vehículos de diésel (de transporte colectivo y de carga).

Figura 7.1 Línea del tiempo PM_{2.5} (µm/m³)

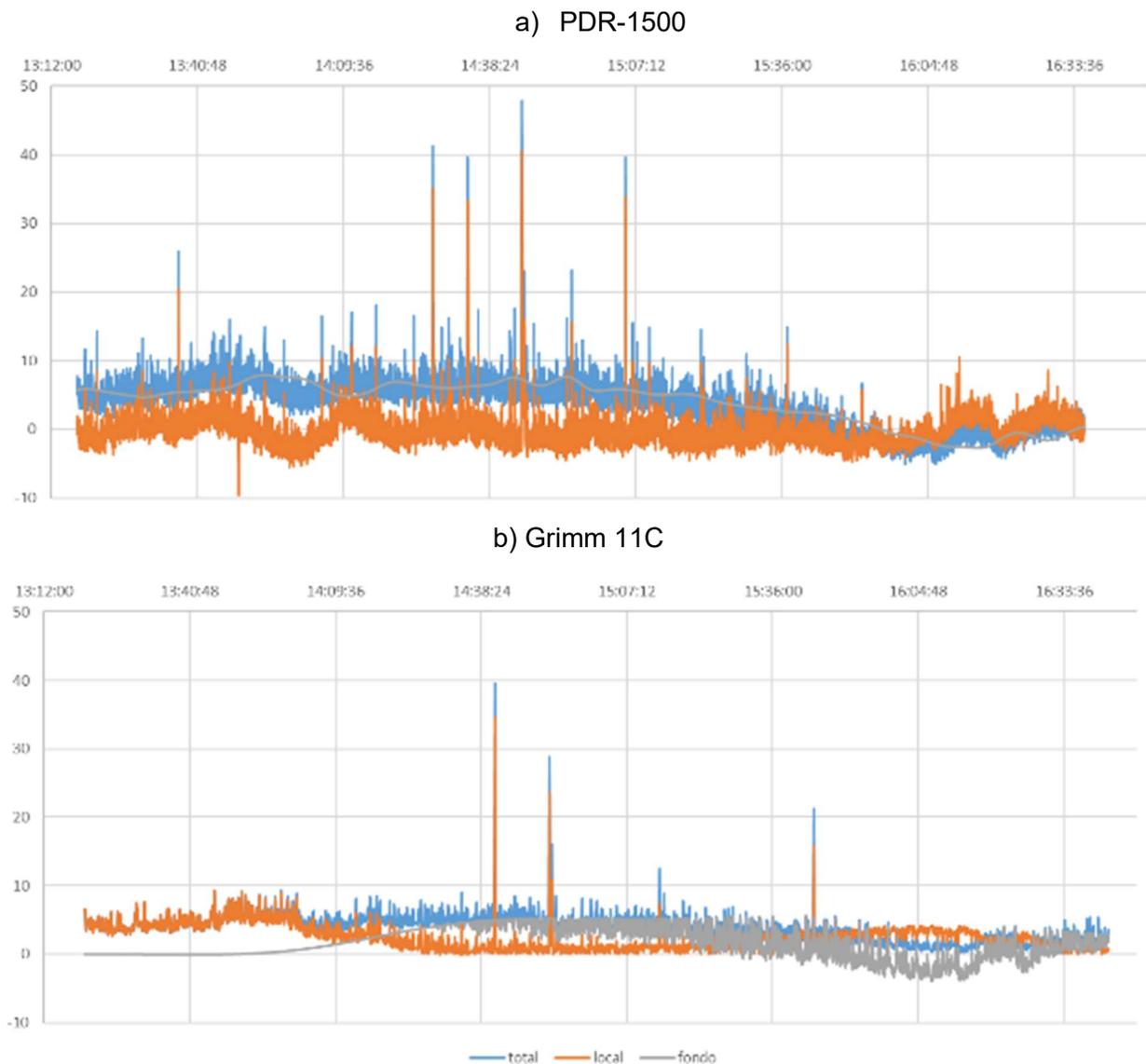


Figura 7.1. Concentración másica de PM_{2.5} en el tiempo. En azul se ven los datos medidos por el analizador. En anaranjado, filtrada la señal atribuible a emisiones locales. En gris, la concentración en el ambiente.

A. (superior) medida con PDR-1500 de Thermo y B. (inferior) con espectrómetro Grimm 11C.

Se observa mayor definición en A y menor dispersión en B.

7.2 Perfil espacial de PM_{2.5}

Los datos de PM_{2.5} estuvieron sincronizados y fueron relacionados con las coordenadas de posición del brazo PACS del SWAP para obtener el perfil espacial de concentración de PM_{2.5} que se muestra en la siguiente Figura 7.2. En cada nivel se observan zonas de alta concentración de PM_{2.5}.

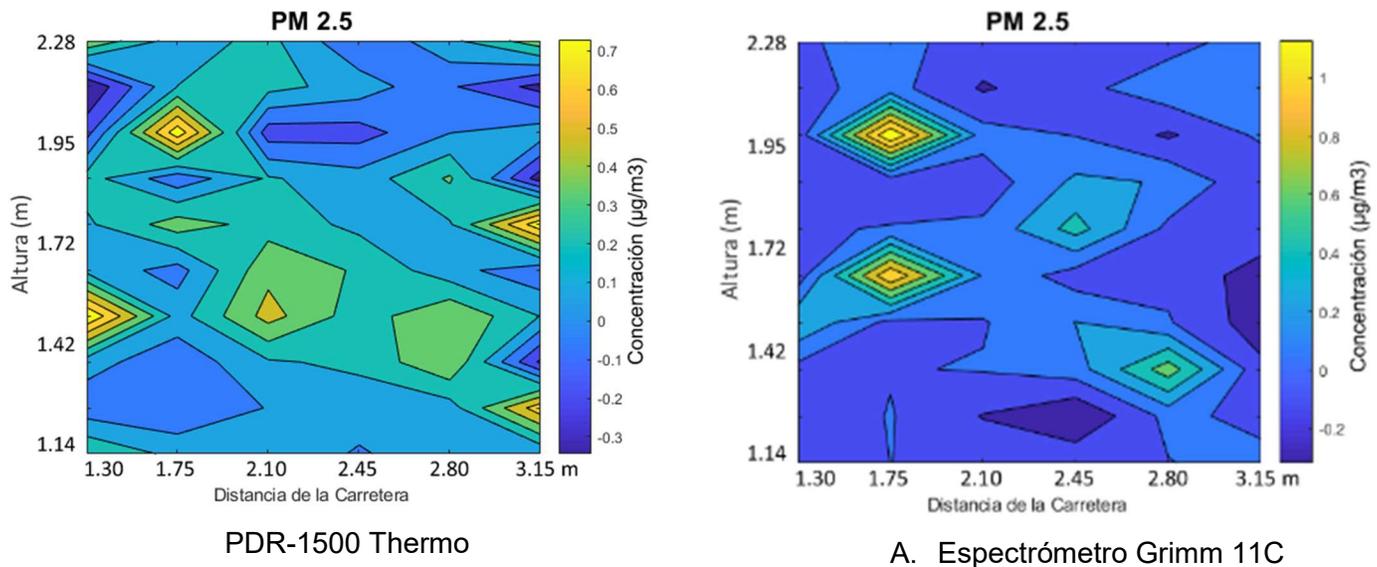


Figura 7.2. Perfil espacial de concentración de PM_{2.5}, graficando distancia y altura conforme al marco de referencia explicado en 5.5 B. La escala de color muestra en amarillo las regiones de mayor concentración de PM_{2.5} y en azul donde hubo menor.

Ambos analizadores sugieren la concentración máxima a 1.75 m de distancia al camino, pero a diferentes alturas. Esta diferencia podría deberse a la rapidez con que mide cada aparato, PDR-1500 Thermo reporta datos seis veces más rápido que el Espectrómetro Grimm 11C. Durante el tiempo de diferencia, el brazo PACS continuaba su movimiento vertical.

7.3 Conteo de partículas

En el muestreo se obtuvieron mayoritariamente PM_{2.5} (del orden de miles hasta varias centenas de miles) contra una minoría de partículas de mayor tamaño (como las de 10 µm del orden de decenas). El Grimm 11-C clasifica las partículas muestreadas por su diámetro aerodinámico.

Las PM_{2.5} son reportadas en las dieciséis clases de tamaño siguientes: (micrómetros):

0.22 - 0.25	0.25 - 0.28	0.28 - 0.3	0.3 - 0.35	0.35 - 0.4	0.4 - 0.45	0.45 - 0.5	0.5 - 0.58
0.58 - 0.65	0.65 - 0.7	0.7 - 0.8	0.8 - 1.0	1.0 - 1.3	1.3 - 1.6	1.6 - 2.0	2.0 - 2.5 µm

Estas clases se denominarán de aquí en adelante por su límite superior.

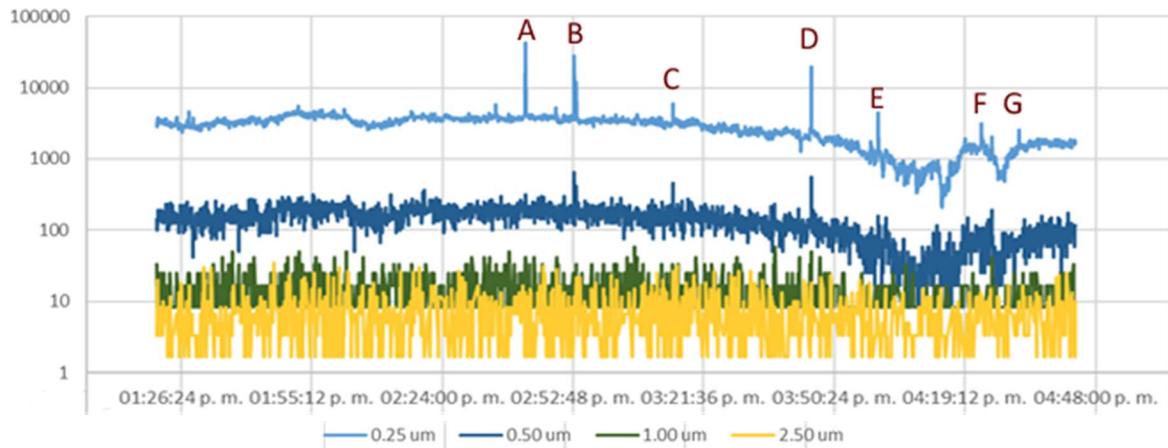


Figura 7.3 Línea de tiempo del muestro de cuatro tamaños representativos de $PM_{2.5}$: $PM < 0.25 \mu m$, $PM < 0.50 \mu m$, $PM < 1.00 \mu m$ y $PM < 2.50 \mu m$. En escala logarítmica se muestra el número de partículas por litro, que para cada diámetro difiere en orden de magnitud.

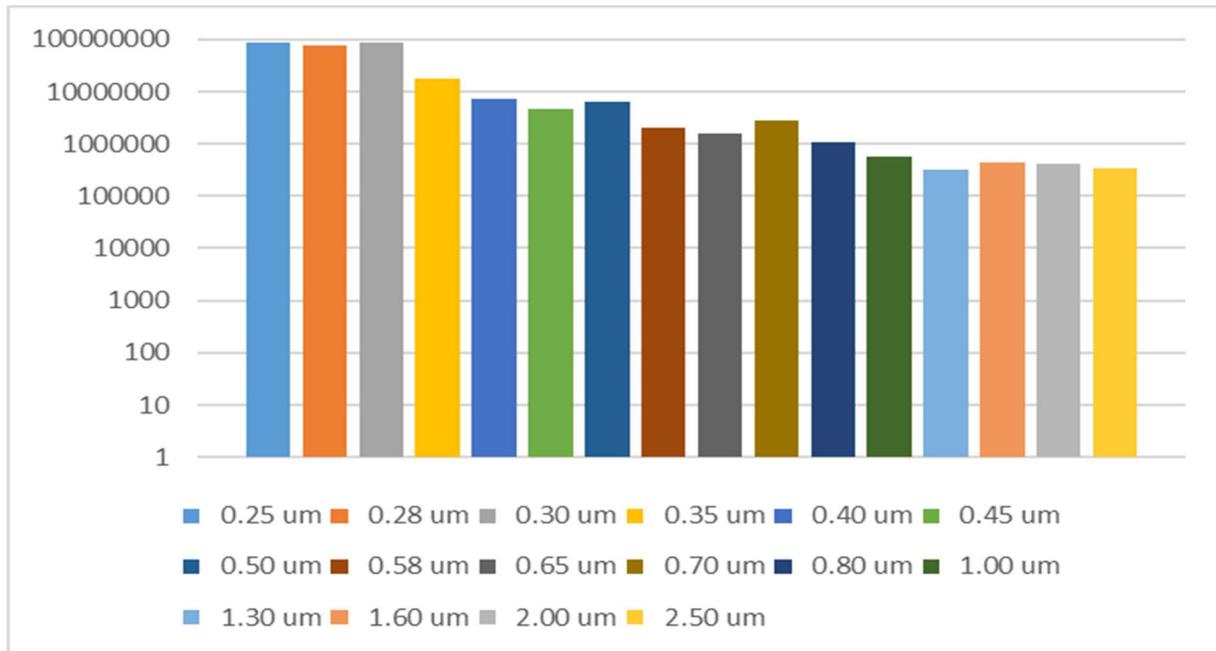
Los picos de aeropartículas observados en la Figura 7.3 fueron identificados por las siguientes fuentes:

- A. 2:42 un camión cargando material de construcción.
- B. 2:53 un pumabús cerca
- C. 3:15 un pumabús y un auto se detuvieron, después, pasó a marcha forzada un triciclo motorizado de carga.
- D. 3:45 No registrado.
- E. 4:00 No registrado.
- F. Varios pumabuses y una combi de transporte especial
- G. Dos camiones de basura

7.4 Total de partículas por cada diámetro

El diámetro de los aerosoles atmosféricos es de amplia gama, y por cada incremento en diámetro, la medición de partículas varía en órdenes de magnitud, acumulándose mayoritariamente en las más finas. Dada esta naturaleza del fenómeno, los estudios reportan $\Delta N/\Delta \log D$ como se observa en la siguiente Figura 7.4.

A) $\Delta N/\Delta \log D$ en dieciséis rangos de tamaño



B) $\Delta N/\Delta \log D$ clasificado en cinco rangos de tamaño.

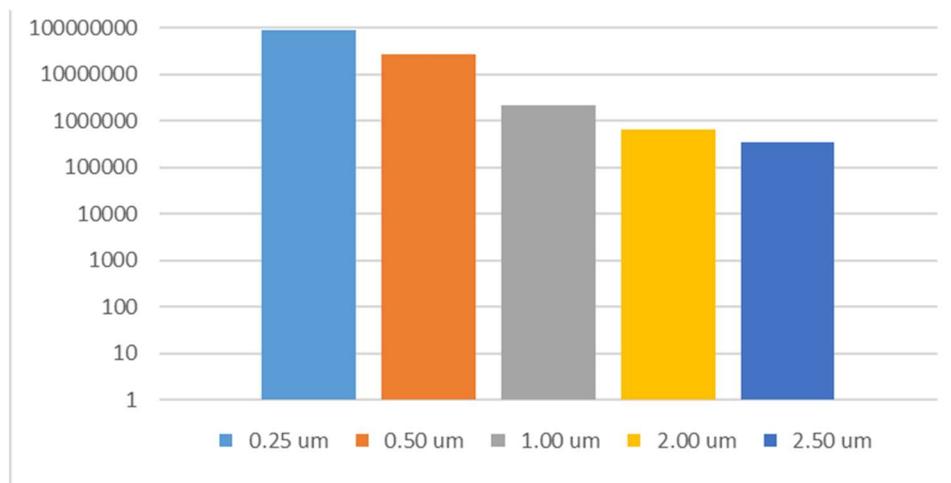


Figura 7.4. Las barras muestran el incremento del número de partícula respecto al logaritmo del diámetro ($\Delta N/\Delta \log D$). A) Contemplando los dieciséis rangos de tamaño medidos por el espectrómetro 11C y B) Clasificado en cinco clases de tamaño.

Las partículas menores a $0.25\mu\text{m}$ dominan en mayor orden de magnitud $10^8/\text{L}$ respecto a las $10^5/\text{L}$ partículas de 2.00 a $2.50\mu\text{m}$.

7.5 Distribución horizontal del número de partículas

El conteo mínimo de partículas se obtuvo en las posiciones extremas del muestreo resaltando a 1.3 m del corte transversal ortogonal a la avenida, contrario a lo que planteaba la hipótesis sobre la cercanía a la emisión vehicular. El conteo máximo se obtuvo a 1.75 m de distancia, seguido por 2.8 m. Esto podría hablarnos de una posible distribución bimodal a contemplarse en estudios posteriores.

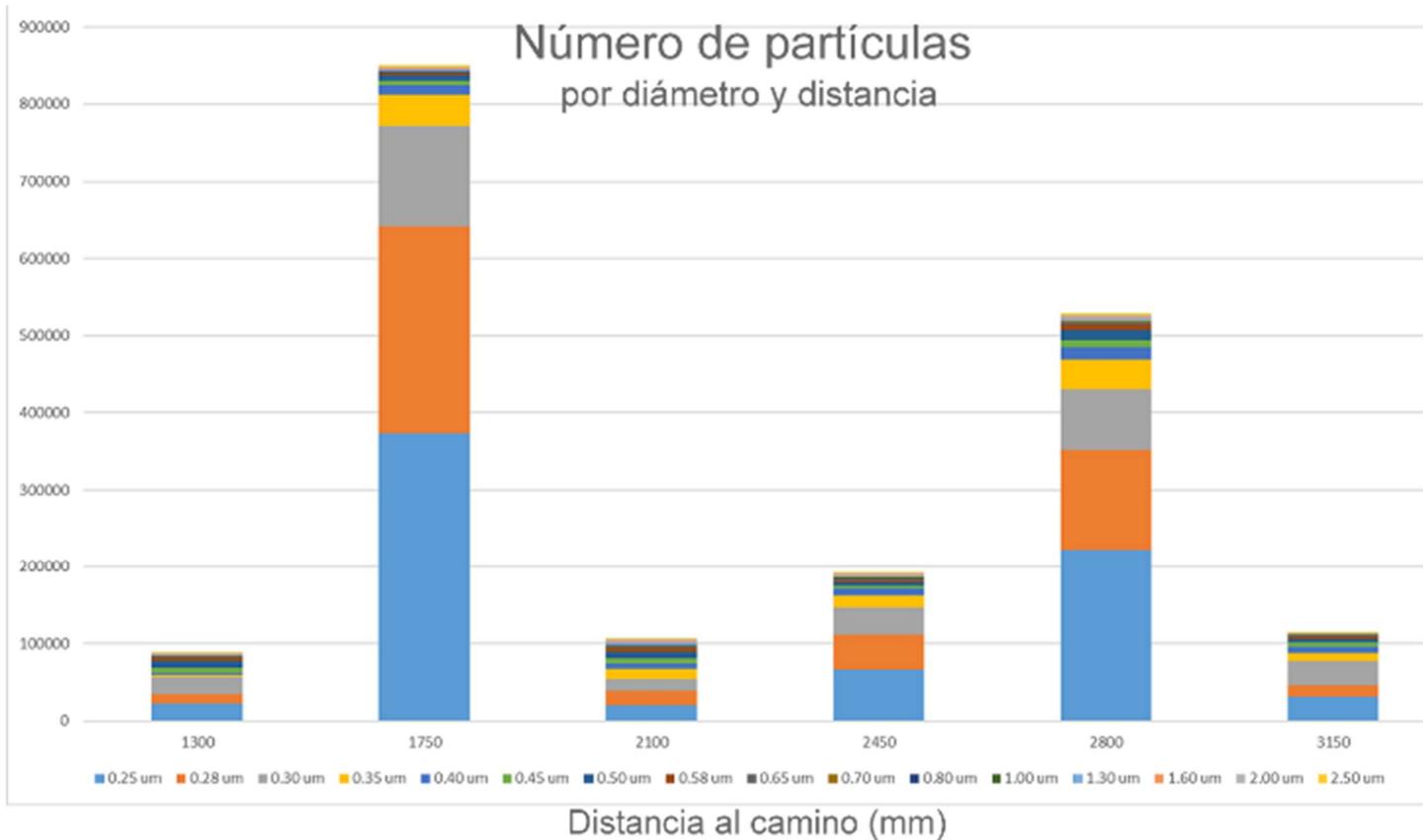


Figura 7.5 Distribución horizontal del número de partículas. En el eje X se muestran las seis distancias discretas consideradas en el muestreo. En el eje vertical se tiene la cantidad de partículas. Las gráficas de barras se encuentran fraccionadas conforme a tamaño de partícula.

7.6 Distribución vertical del número de partículas

El conteo máximo de partículas se dio a una altura entre 1.14 y 1.42 m, a un nivel respirable por niños. El conteo mínimo se dio sobrepasado los 2.0 m cerca del límite de muestreo. En cada barra se observa la misma composición de tamaño que en la anterior Figura 7.4.

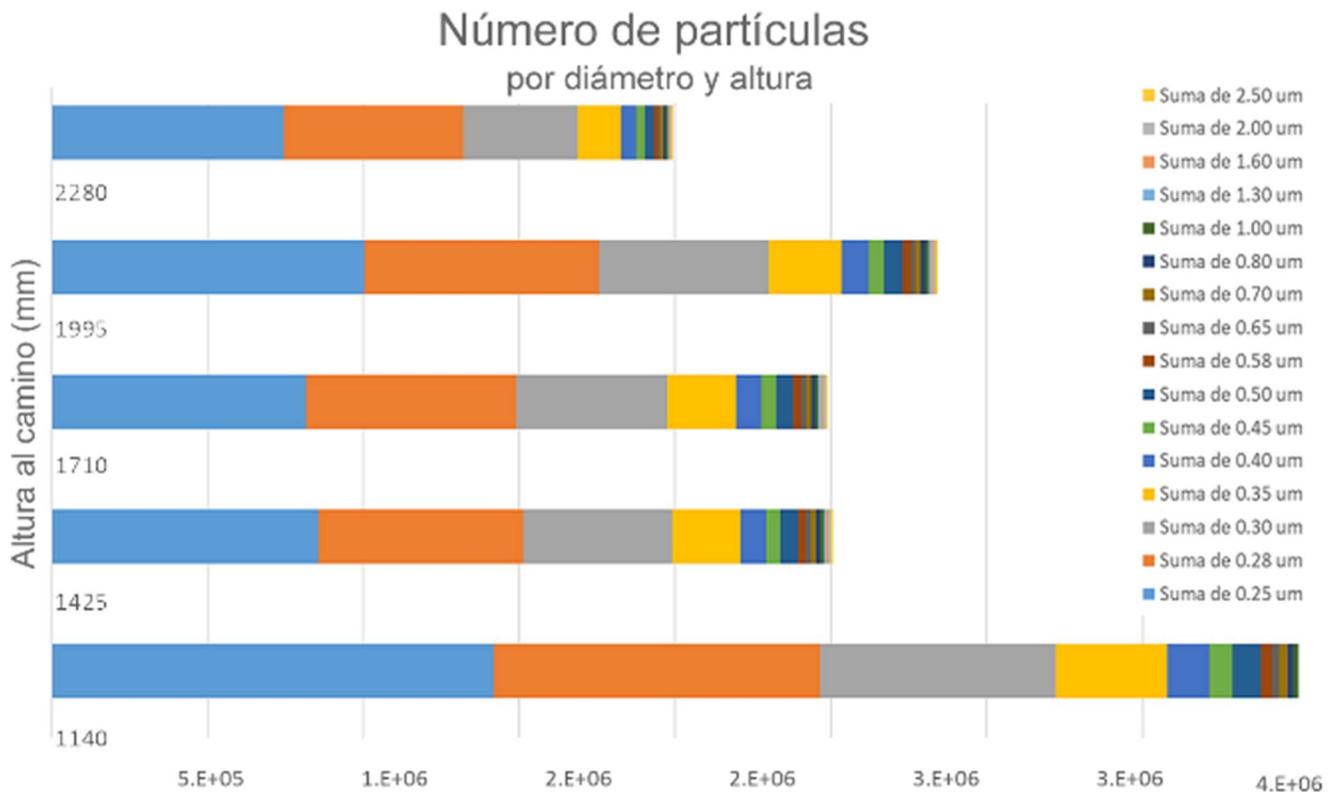


Figura 7.6 Distribución vertical del número de partículas. En el eje Z se muestra la variable independiente discretizada en clases. En el eje horizontal, ampliado la escala en millones, se tiene la cantidad de partículas. Las gráficas de barras se encuentran fraccionadas conforme a tamaño de partícula. Los límites del muestreo son 1140 y 2280 mm, las clases de altura son las siguientes:

- De 1140 a 1424mm
- de 1425 a 1709 mm
- de 1710 a 1994mm
- de 1995 a 2280 mm

7.7 Distribución reticular de $\Delta N/\Delta \log D$

La Figura 7.7 muestra $\Delta N/\Delta \log D$ para cada coordenada en X, Z. Sobresale el máximo a $x= 1750\text{mm}$ con un orden de magnitud de 10^7 de partículas/L menores a $0.25 \mu\text{m}$.

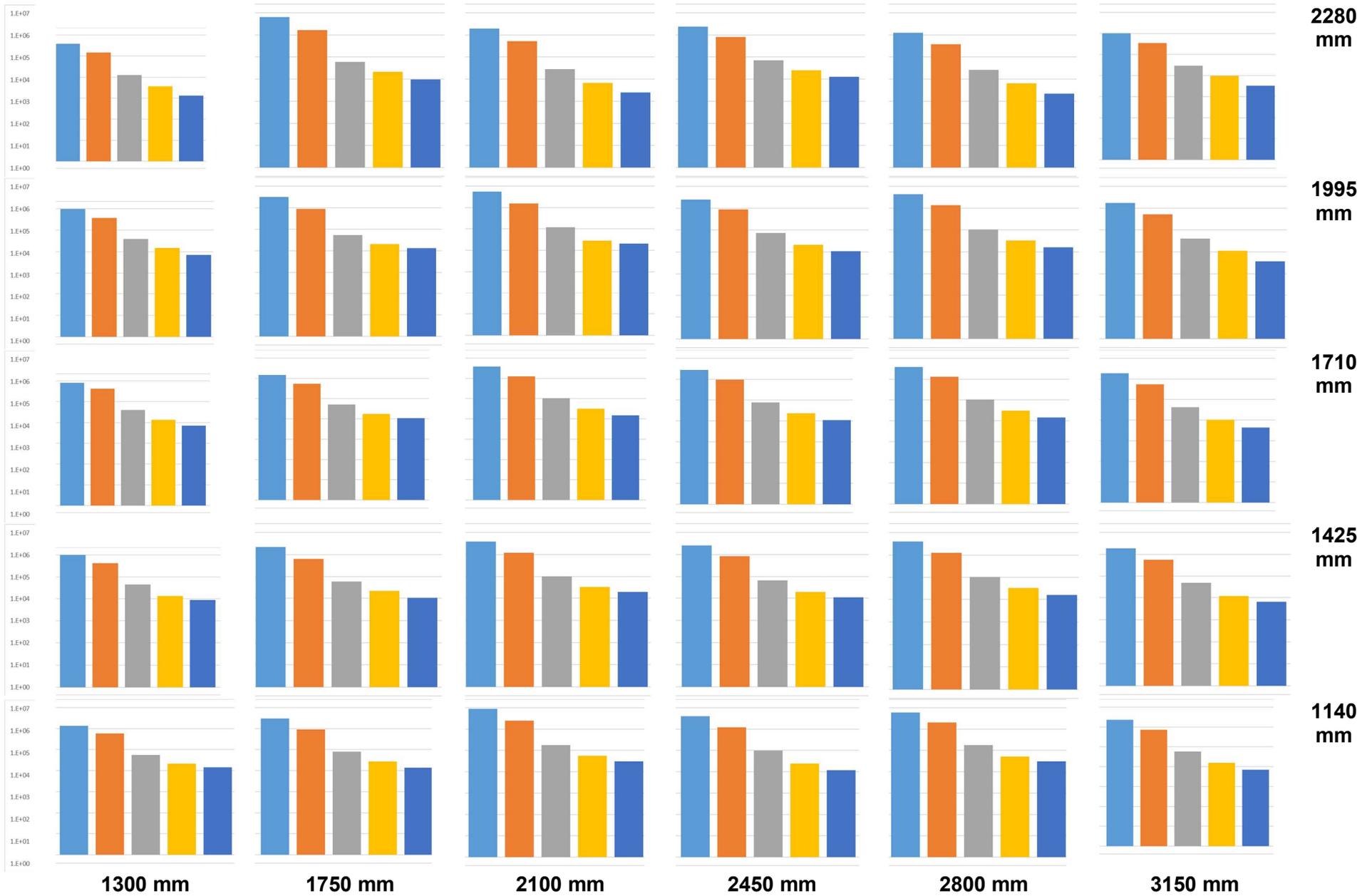


Figura 7.7 Cada gráfica en la cuadrícula muestra para cada coordenada de muestreo (ver sección 5.5) el perfil de tamaño obtenido. Las barras de colores muestran $\Delta N / \Delta \log D$ en escala logarítmica en cinco clases. $< 0.25 \mu\text{m}$ $0.25 - 0.50 \mu\text{m}$ $0.50 - 1.00 \mu\text{m}$ $1.00 - 2.00 \mu\text{m}$ $2.00 - 2.50 \mu\text{m}$

7.8 Perfil espacial de aeropartículas

La siguiente Figura 7.8 muestra cuatro perfiles de conteo de aeropartículas mapeados con los datos filtrados. Se grafica la señal local atribuible a emisiones vehiculares aisladas de la señal de fondo del entorno (Ver 5.6). Los patrones cambian a distintos tamaños de partículas debido a la turbulencia del fenómeno.

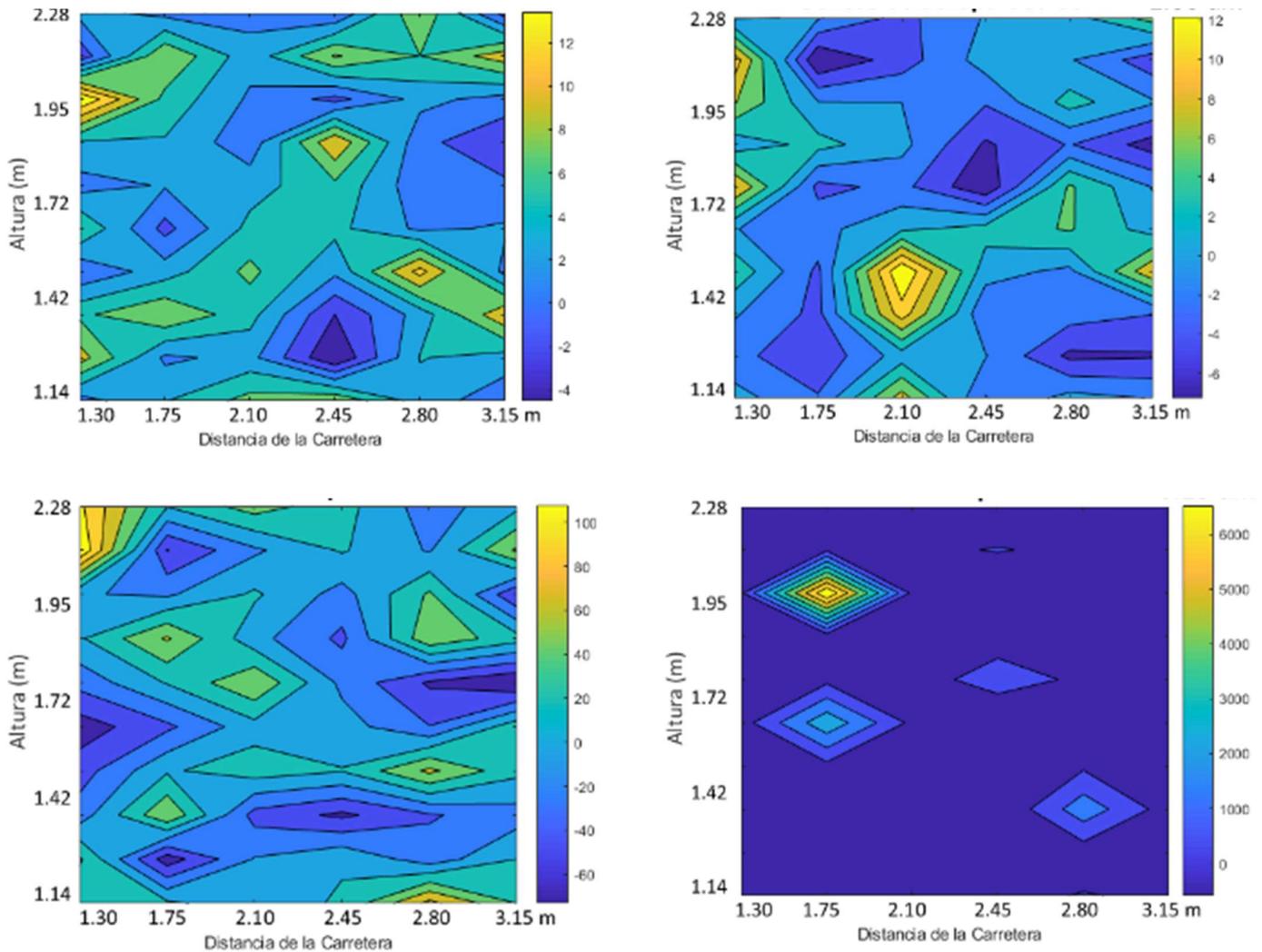


Figura 7.8 Perfiles espaciales de partículas de cuatro tamaños representativos respecto a distancia al camino y altura sobre el nivel del piso. La escala de color muestra en amarillo las regiones de mayor cantidad y en azul donde hubo menor conteo. Los tamaños graficados son: A. (arriba izquierda) $2.50 \mu\text{m}$; B. (arriba derecha) $1.00 \mu\text{m}$; C. (abajo izquierda) 0.50 ; y D. (abajo derecha) $0.25 \mu\text{m}$.

El máximo de $\text{PM}_{2.5}$ fue de $4.05 \cdot 10^6$ partículas/L a una altura entre 1.14 m y 1.42 m, lo que expone a niños a mayor riesgo. De este máximo, $3.22 \cdot 10^6$ partículas/L corresponden a los tamaños más finos entre $0.22 \mu\text{m}$ y $0.30 \mu\text{m}$.

7.9 Distribución por penetración en vías respiratorias

El análisis anterior se centró en $PM_{2.5}$ (partículas menores a $2.5 \mu m$). A continuación se reportan resultados de las partículas muestreadas de 0.22 a $32 \mu m$ clasificadas por su posibilidad de penetración en vías respiratorias como inhalables (PM_{10}), torácicas (PM_{10}) y alveolares ($PM_{0.1}$).

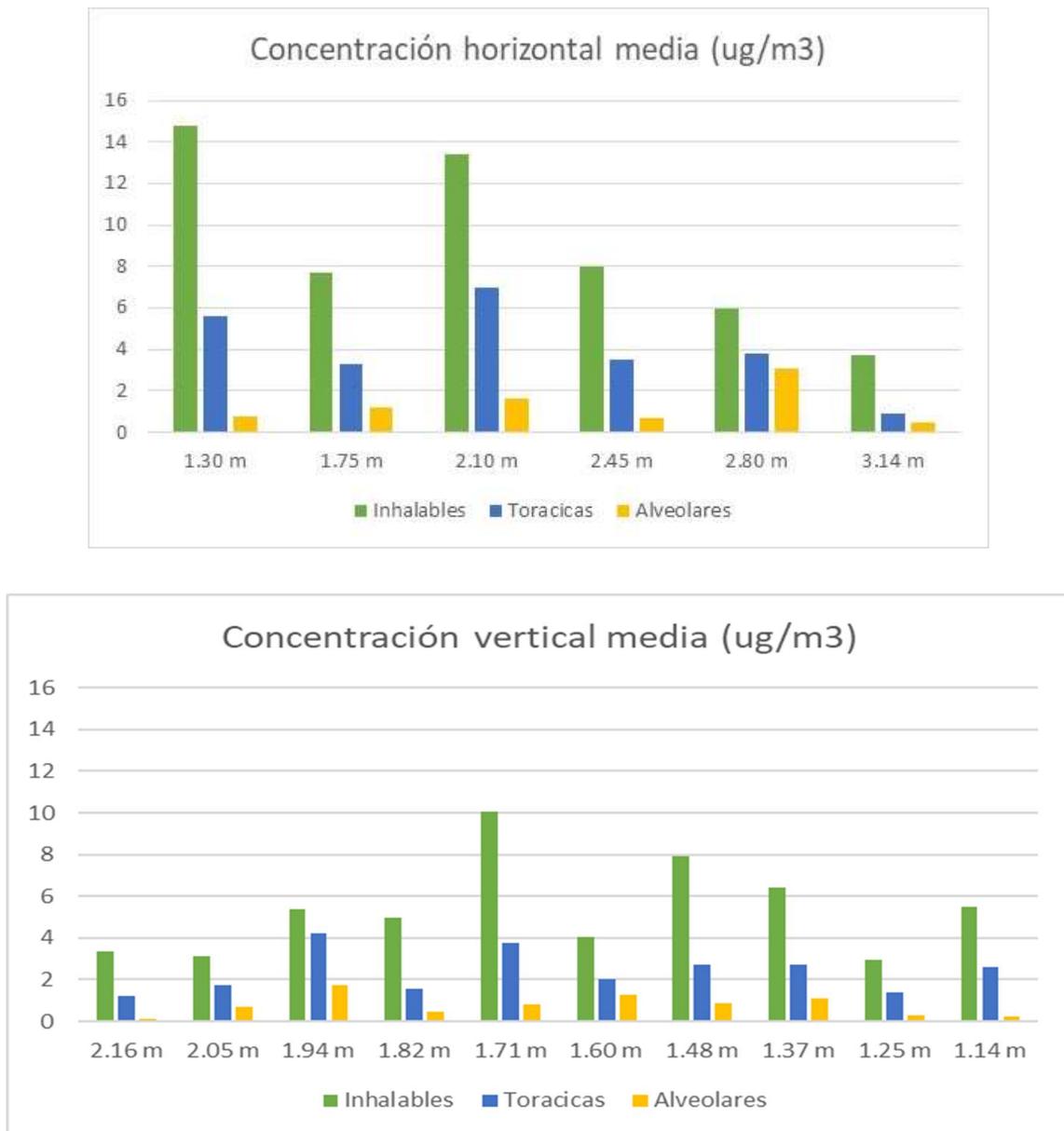


Figura 7.9 Masa de aeropartículas clasificadas por su penetración en vías respiratorias. A) Arriba: por corte horizontal y B) Abajo: por corte vertical.

Se obtuvo la máxima concentración de partículas alveolares entre 1.37 y 1.60 m de alto, lo que pone en riesgo a la población en general.

7.10 Perfil espacial de partículas respirables

Se muestran tres perfiles de masa de aeropartículas por emisiones vehiculares locales clasificadas por penetración en vías respiratorias.

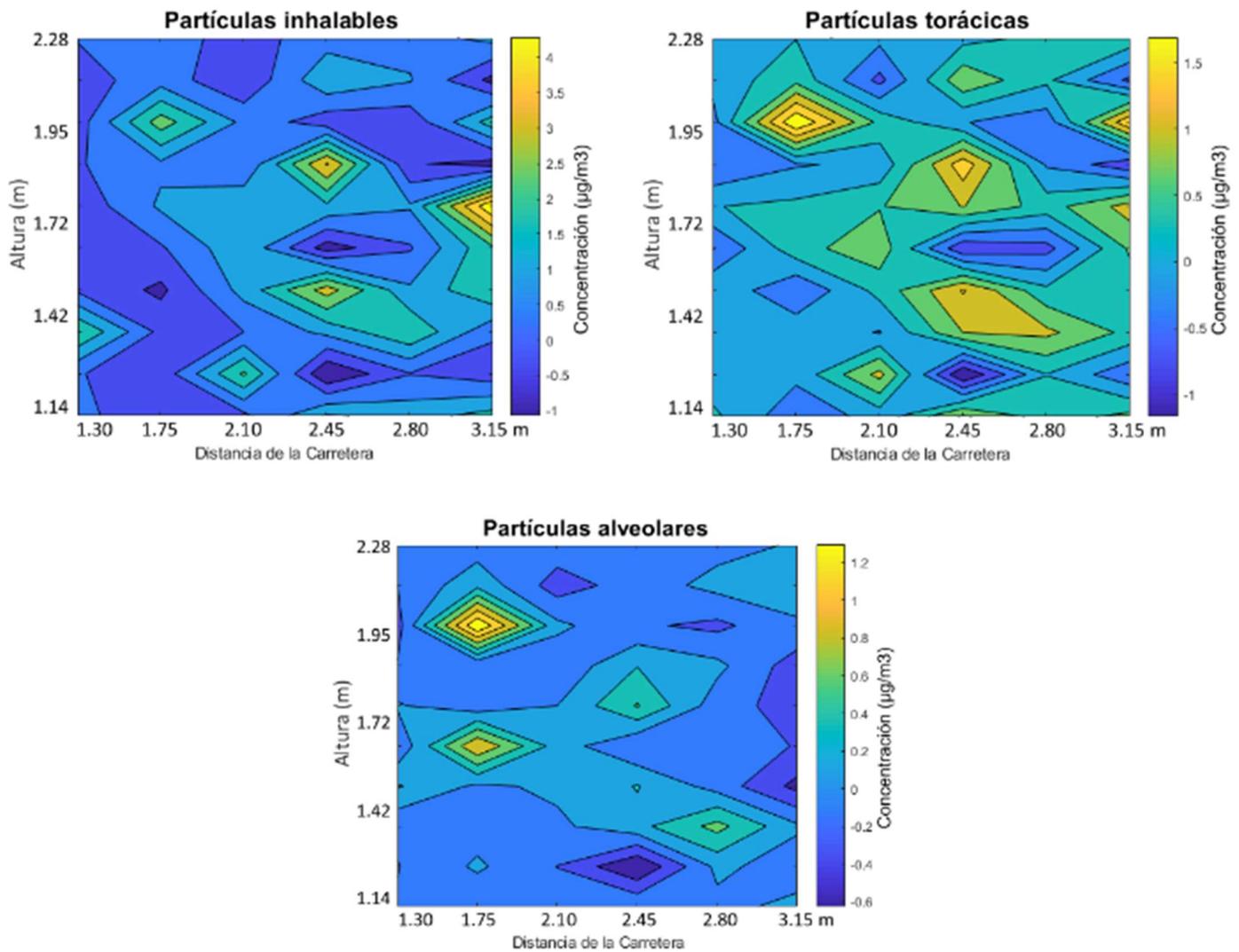


Figura 7.10 Perfil espacial de concentración másica de aeropartículas por distancia al camino y altura sobre el nivel del piso. Los valores negativos (azul oscuro) representan zonas con concentración local menor a la del ambiente. Los niveles máximos se muestran en amarillo. A. (arriba izquierda) partículas inhalables; B. (arriba derecha) partículas torácicas; C. (abajo) partículas alveolares.

8. Análisis general

Este primer estudio permitió identificar las zonas donde se concentran mayoritariamente las partículas Aitken y nodos de acumulación, clasificadas por diámetro y por su posible penetración en las vías respiratorias.

En este experimento, la sincronización de cada dispositivo fue fundamental. Es recomendable que cada analizador reporte datos cada segundo o con mayor frecuencia (>1 Hz). De esta manera se obtienen resultados con mayor resolución y más significativos. El espectrómetro Grimm 11C empleado para caracterizar el tamaño de partícula se limita a un dato cada 6 segundos en su máxima frecuencia de operación ($1/6$ Hz), lo que da una incertidumbre de ≈ 7 cm considerando la velocidad de desplazamiento del brazo PACS del SWAP.

El algoritmo empleado (ver 5.6) permitió aislar las emisiones locales separadas de la concentración fondo, facilitando su estudio.

El perfil de aeropartículas (Figuras 7.8 y Anexo I) es afectado por la turbulencia del ambiente y presenta variaciones notables para cada rango de tamaño.

9. Conclusiones

En este proyecto se obtuvo el perfil espacial de aeropartículas caracterizadas por su diámetro aerodinámico (0.25 a 2.5 μm). En él se encontró una mayor cantidad de partículas finas (de 0.25 a 0.45 μm) a una altura entre 1.14 m y 1.42 m, lo que expone a niños a riesgo. Además, se halló una mayor masa de partículas alveolares (menores a 0.1 μm) de 1.37 m a 1.72 m de alto, lo que expone a la población general.

En desacuerdo con la hipótesis planteada (que a mayor cercanía a la fuente, se obtendrían partículas más finas), no se observó de la manera esperada este cambio progresivo de tamaño de partícula. Sin embargo, el método hizo posible identificar las zonas espaciales con mayor concentración de partículas finas Aitken a una distancia de 1.75 m respecto a una avenida.

Para mejorar el análisis de datos, en estudios posteriores se debe considerar simular u obtener un perfil de turbulencia.

El método es funcional y reproducible, permite estudiar contaminantes en cañones urbanos. Estudiar la distribución espacial de aeropartículas y otros contaminantes ambientales da pauta a su mitigación local estratégica.

10. Referencias

- Aladro, M. (2012). *Estudio de la formación de aerosoles orgánicos secundarios en un modelo fotoquímico mediante experimentos en una cámara de simulación atmosférica*. Tesis, Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Ciencias Químicas, Departamento de Ingeniería Química.
- Cabras, E. (2014). *Efectos de la morfología de las calles en el fenómeno de la isla de calor urbana en la ciudad de Barcelona*. Tesis Universidad Politécnica de Cataluña, Departamento de Construcciones Arquitectónicas.
- Camacho, P. (2016). *Inventario de emisiones de la Ciudad de México*. México, México: SEDEMA, Gobierno de la Ciudad de México.
- Erazo Arcos, A. (2016). *Caracterización espacio-temporal de la contaminación atmosférica de partículas 2.5µm, carbono negro y óxidos de nitrógeno al lado del arroyo vehicular*. Tesis, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Hinds, W. (1982). *Aerosol Technology. Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*. . EE.UU: John Wiley & Sons.
- Izaguirre, M. A. (2014). The influence of configuration of urban canyons in pedestrian confort. *Nova scientia*.
- Jazcilevich et al., D. I. (2018). Sidewalk pollution flows caused by vehicular traffic place children at a higher acute exposure risk. *International Society of Exposure Science*.
- Jorba. (2005). *Simulación de los campos de viento de la península Ibérica y el área geográfica de Catalunya con alta resolución espacial para distintas situaciones meteorológicas típicas*. Tesis, Universitat Politècnica de Catalunya.
- Lipp, D. (2014). El cañón urbano y su incidencia en la contaminación del aire. *Actas Congreso Internacional de Geografía*.
- Lippmann, M. K. (2000). *Association of Particulate Matter Components with Daily Mortality and Morbidity in Urban Populations. Air Sampling Instruments for Evaluation of Atmospheric Contaminants*. Ohio, EUA: American Conference of Governmental Industrial Hygienists.
- NOM-025-SSA1-2014. (s.f.). Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014.
- Pitts y Pitts, F.-P. B. (2000). *Chemistry of the upper and lower chemistry*. Academic Press.
- Rojas y Garibay, R. B. (2003). Las partículas suspendidas, aeropartículas o aerosoles: ¿Hacen daño a la salud? ¿Podemos hacer algo? *Gaceta Ecológica*.
- SciELO. (s.f.). Obtenido de <http://www.scielo.org.mx>
- SEDEMA, C. P. (2016). *Inventario de emisiones de la Ciudad de México*. México, Ciudad de México: Gobierno CDMX. Obtenido de <http://www.aire.cdmx.gob.mx>
- Seinfeld J.H, P. S. (1998). *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. Wiley.
- WHO, W. H. (2002). Air Quality Guidelines. *World Health Organization, Geneva, Switzerland*, https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/69478/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf;jsessionid=C6484DA82B689130C9D6E6F697CB1A51?sequence=1.
- Wilks. (2006). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. EUA: Elsevier.
- Zavala J.D. et al., J. L.-P.-P. (2019). Studying human exposure to vehicular emissions using computational fluid dynamics and an urban mobility simulator: The effect of sidewalk residence time, vehicular technologies and a traffic-calming device. *Elsevier*.

11. Anexo I. Perfil espacial de conteo promedio de aeropartículas

