UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Medición de perfiles verticales de material particulado en la Sabana de Bogotá

Daniel Alejandro Jaimes Gonzalez

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental

Bogotá, Colombia

2022

Medición de perfiles verticales de material particulado en la Sabana de Bogotá

Daniel Alejandro Jaimes Gonzalez

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería Ambiental

Director (a):

Doctor Néstor Yezid Rojas Roa

Línea de Investigación:

Contaminación del aire por material particulado: caracterización

Grupo de Investigación:

Calidad del aire

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental

Bogotá, Colombia

2022

A mis padres quienes me han apoyado incondicionalmente, lo han dado todo para que yo sea mejor persona y profesional, hoy estoy un paso más adelante en mi vida, les dedicó este trabajo y todo lo que viene de aquí en adelante

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

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

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

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

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

Daniel Alejandro Jaimes Gonzalez

Fecha 17/03/2022

Agradecimientos

Este trabajo no hubiera sido posible sin el apoyo de muchas personas, que me ofrecieron todo tipo de apoyo, económico, emocional, profesional y académico.

Gracias especiales al señor Juan Carlos Pachon de CanAir.io, quienes amablemente me acompañaron en toda la operación y uso de los sensores utilizados, a quienes les deseo lo mejor con esto sensores y que sigan con la labor que han avanzado.

Gracias a los ingenieros Edwin Garcia y Luis Zarate de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, quienes aportaron el equipo *drone* utilizado y las estaciones de calidad del aire usadas para la validación de los sensores. Espero esta nueva metodología de monitoreo sea útil para ustedes.

Gracias a los profesores Luis Carlos Belalcázar y Néstor Rojas de la Universidad Nacional de Colombia, quienes me dieron la oportunidad para iniciar y finaliza mi maestría, Espero los resultados y experiencias obtenidas sean de utilidad para ustedes y otros estudiantes. En mi ganan un apoyo para futuras investigaciones y trabajos.

Gracias a Cristian Diaz, Edwin Suarez Javier Salas, Edison Ortiz y las demás personas que con sus acciones me ayudaron en uno u otro momento.

Gracias a Camilo Rodríguez, me dio animo cuando más lo necesitaba y gracias a sus consejos y guía puedo finalizar mis estudios de maestría.

Resumen

Medición de perfiles verticales de material particulado en la Sabana de Bogotá

La calidad del aire es una de las mayores preocupaciones para la ciudadanía. En los últimos años se han emitido estados de prevención por la mala calidad del aire en la ciudad de Bogotá y los alrededores. Un componente clave en la declaración de alertas ha sido el pronóstico de la calidad del aire con modelos de transporte químico de la atmósfera.

Este tipo de herramientas se alimenta de datos satelitales y de superficie para su ajuste y verificación. Sin embargo, para el caso de material particulado, solo existen mediciones a nivel del suelo o mediciones remotas. Contar con herramientas para la medición de material particulado en la vertical puede fortalecer el desempeño de estos modelos.

En este trabajo, se evalúa el uso de sensores de bajo costo y su uso en equipos *drone* para la medición de material particulado a diferentes alturas, en los primeros 500 metros de la atmósfera. Esto permite la obtención de perfiles de concentración, los cuales muestran que la atmósfera presenta al menos dos capas bien diferenciadas desde la madrugada, antes de alcanzar una concentración uniforme por mezclado vertical.

Palabras clave: Sensores de bajo costo. PM2.5, *Drone*, Perfiles verticales

Abstract

Measurement of vertical profiles of particulate matter in the Bogotá Savanna

Air quality is a major concern for citizens. In the last few years, air pollution alerts have been declared in the city of Bogota and its surrounding areas. These alerts have been known in advance of their occurrence thanks to the city's air quality forecasting and modeling tools.

This type of tool relies on satellite and surface data for adjustment and verification. However, for particulate matter, only ground level or remote measurements are available. Having tools for measuring particulate matter vertically can strengthen the performance of these models.

In this work, we evaluate the use of low-cost sensors and their use in *drone* equipment for the measurement of particulate matter at different altitudes, in the first 500 meters of the atmosphere. This allows obtaining concentration profiles, which show that the atmosphere presents at least two well differentiated layers from early morning, before reaching a uniform concentration by vertical mixing.

Keywords: Low cost sensors. PM2.5, *Drone*, Vertical Profiles

Contenido

Pág.

Resumen ..... **IX**

Lista de figuras ..... **XIII**

Lista de tablas ..... **XVIII**

Lista de Símbolos y abreviaturas ..... **XX**

Introducción **1**

1. Generalidades **3**
1.1 Perfiles verticales de calidad del aire 3
1.1.1 Radiosondeos 4
1.1.2 UAV o *Drone* 6
1.2 Sabana de Bogotá y calidad del aire 9
1.3 Sensores de bajo costo 10

2. Metodología **12**
2.1 Evaluación de la aptitud de los sensores de material particulado 12
2.1.1 Sensor usado 12
2.1.2 Instalación de sensores 13
2.1.3 Operación de sensores 14
2.1.4 Criterios de evaluación 14
2.2 Medición de perfiles verticales 15
2.2.1 Monitoreo con *UAV* 15
2.3 Evaluación de implementación de sensores en UAV 18
2.3.1 Ubicación monitoreos 18
2.3.2 Datos para validación de sensores en *UAV* 18
2.3.3 Análisis estadístico a la altura de la estación 19
2.4 Interpretación de perfiles verticales 20
2.4.1 Variabilidad de perfiles 20
2.4.2 Segmentación de perfiles verticales 20

3. Resultados **25**
3.1 Comparación de sensores 25
3.1.1 Instalación de sensores 25
3.1.2 Error y desviación 26

3.1.3 Efecto de variables atmosféricas 35
3.2 Monitoreo *UAV* o *drone* 37
3.2.1 Monitoreo en la ciudad de Bogotá 37
3.2.2 Monitoreo en Mosquera 46
3.2.3 Comparación sensores instalados en *UAV* con estación de referencia 50
3.2.4 Medición de masas con concentración alta de material particulado 54
3.3 Comparación con alturas de modelación 55

4. Conclusiones y recomendaciones 59
4.1 Conclusiones 59
4.2 Recomendaciones 60

Bibliografía 63

5. Anexo A: Validación sensores 71

Lista de figuras

Pág.

Ilustración 1-1 Radiosondeos 12 a 14 de agosto de 2021. Adaptado [10]. 5
Ilustración 1-2 Diferencias en alturas de las mediciones entre los radiosondeos. Adaptado [11] [10] 5
Ilustración 1-3 Estaciones de monitoreo de la calidad del aire en la ciudad de Bogotá y alrededores. Adaptado[47], [48]. 10
Ilustración 2-1 Precipitaciones mensuales Ráquira, estación La Candelaria – CAR [51] 13
Ilustración 2-2 Esquema de monitoreo sensores SPS30 en sistema *UAV* Matrice 600. Tomado y adaptado de https://www.dji.com/matrice600 17
Ilustración 2-3 Derecha, estación de calidad del Aire DLIA. Izquierda *UAV* con sensores. 10 metros de distanciamiento entre la estación y el *UAV* 19
Ilustración 2-4 Perfiles verticales 4 de marzo, 7:50 am 23
Ilustración 3-1 Instalación sensores de calidad del aire en la estación de Ráquira. 26
Ilustración 3-2 Instalación sensores de calidad del aire en la estación de DLIA 26
Ilustración 3-3 Sensores y monitor de referencia estación Ráquira, Monitoreo realizado entre el 14 de octubre 2021 y el 30 de octubre de 2021. $PM_{2.5}$. 27
Ilustración 3-4 Sensores y monitor de referencia estación DLIA, Monitoreo realizado entre el 17 de febrero de 2022 y el 24 de febrero de 2022. 29
Ilustración 3-5 Correlación minutal sensor 1 SPS_30 4A3A con monitor de referencia, Estación DLIA 31
Ilustración 3-6 Correlación minutal sensor 1 SPS_30 4E2E con monitor de referencia, Estación DLIA 32
Ilustración 3-7 Correlación minutal sensores SPS_30 4A3A y SPS_30 4E2E 32
Ilustración 3-8 Matriz de coeficientes de correlación de Pearson (por 100), monitoreos estación DLIA 36

Ilustración 3-9 Sensores SPS30 y variables atmosféricas en la estación DLIA, Monitoreo realizado entre el 17 de febrero de 2022 y el 23 de febrero de 2022.....36
Ilustración 3-10 Correlación horaria sensor SPS30 4A3A con sensor de temperatura 37
Ilustración 3-11 Perfil vertical de $PM_{2.5}$ en la ciudad de Bogotá 5:10 am 2022-02-02 39
Ilustración 3-12 Perfil vertical de PM2.5 en la ciudad de Bogotá 5:30 am 2022-02-02 39
Ilustración 3-13 Perfil vertical de PM2.5 en la ciudad de Bogotá 5:50 am 2022-02-02 40
Ilustración 3-14 Perfil vertical de PM2.5 en la ciudad de Bogotá 6:30 am 2022-02-02 40
Ilustración 3-15 Cortes en la atmosfera en Bogotá 5:10 am 2022-02-02 con vuelo en ascenso 41
Ilustración 3-16 Cortes en la atmosfera en Bogotá 5:10 am 2022-02-02 con vuelo en descenso 42
Ilustración 3-17 Cortes en la atmosfera en Bogotá 5:30 am 2022-02-02 con vuelo en ascenso 42
Ilustración 3-18 Cortes en la atmosfera en Bogotá 5:30 am 2022-02-02 con vuelo en descenso 43
Ilustración 3-19 Mediciones de material particulado en la ciudad de Bogotá 2- febrero de 2022, 5:10 am a 9:10am 45
Ilustración 3-20 Capas atmosféricas propuestas para la ciudad de Bogotá basado en particulado en la ciudad de Bogotá 2- febrero de 2022, 5:10 am a 9:10am.....45
Ilustración 3-21 Mediciones de material particulado en Mosquera 1 de marzo 2022, 5:10 am a 9:50am.....46
Ilustración 3-22 Capas atmosféricas propuestas para la ciudad de Bogotá basado en material particulado en el municipio de Mosquera 25 de febrero de 2022 a 4 de marzo de 2022.....47
Ilustración 3-23 Capas atmosféricas propuestas para el municipio de Mosquera basado en la medición de material particulado 25 de febrero de 2022, 6:10 am a 7:30am.....48
Ilustración 3-24 Capas atmosféricas propuestas para el municipio de Mosquera basado en la medición de material particulado 26 de febrero de 2022, 5:30 am a 8:50am.....48
Ilustración 3-25 Capas atmosféricas propuestas para el municipio de Mosquera basado en la medición de material particulado 27 de febrero de 2022, 5:30 am a 9:30am.....48
Ilustración 3-26 Capas atmosféricas propuestas para el municipio de Mosquera basado en la medición de material particulado 28 de febrero de 2022, 6:10 am a 9:30am.....49

Ilustración 3-27 Capas atmosféricas propuestas para el municipio de Mosquera basado en la medición de material particulado 1 de marzo de 2022, 5:10 am a 9:50am..... 49
Ilustración 3-28 Capas atmosféricas propuestas para el municipio de Mosquera basado en la medición de material particulado 2 de marzo de 2022, 5:30 am a 9:50am..... 49
Ilustración 3-29 Capas atmosféricas propuestas para el municipio de Mosquera basado en la medición de material particulado 3 de marzo de 2022, 5:30 am a 8:50am..... 50
Ilustración 3-30 Capas atmosféricas propuestas para el municipio de Mosquera basado en la medición de material particulado 3 de marzo de 2022, 5:30 am a 10:10am..... 50
Ilustración 3-31 Correlación de datos capturados de $PM_{2.5}$ por los sensores en UAV entre 15 y 25 metros y la estación DLIA. 25 de febrero a 4 de marzo..... 51
Ilustración 3-32 Correlación de datos promedio capturados de $PM_{2.5}$ en UAV entre 15 y 25 metros y la estación DLIA. 25 de febrero a 4 de marzo 52
Ilustración 3-33 Correlación de datos promedio capturados de $PM_{2.5}$ con los sensores 4A3A y 4E3E entre 15 y 25 metros 25 de febrero a 4 de marzo..... 53
Ilustración 3-34 Deltas de concentración acumulado para los monitoreos realizados en el municipio de Mosquera 54
Ilustración 3-35 Histograma de distribución de espesores de capas obtenidas para los monitoreos del 25 de febrero a 4 de marzo 56
Ilustración 5-1 Promedios horarios de $PM_{2.5}$ en la estación de DLIA y los sensores validados 72
Ilustración 5-2 Correlación horaria sensor 1 SPS_30 4A3A con monitor de referencia, Estación DLIA 73
Ilustración 5-3 Correlación horaria sensor 1 SPS_30 4E2E con monitor de referencia, Estación DLIA 74
Ilustración 5-4 Porcentaje de datos capturados en el monitoreo de la Estación DLIA..... 75
Ilustración 5-5 Correlación diaria sensor 1 SPS_30 4A3A con monitor de referencia, Estación DLIA 76
Ilustración 5-6 Correlación diaria sensor 1 SPS_30 4E2E con monitor de referencia, Estación DLIA 77
Ilustración 5-7 Correlación minutal sensor SPS_30 4A3A con monitor de referencia, Estación DLIA 78
Ilustración 5-8 Correlación minutal sensor SPS_30 4E2E con monitor de referencia, Estación DLIA 79

Ilustración 5-9 Dispersión sensores utilizados en la Estación DLIA 80
Ilustración 5-10 Promedios horarios de PM2.5 en la estación de Raquirá y los sensores validados 81
Ilustración 5-11 Correlación horaria sensor 1 SPS_30 4A3A con monitor de referencia, Estación Ráquira 82
Ilustración 5-12 Correlación horaria sensor 2 SPS_30 4E2E con monitor de referencia, Estación Ráquira 83
Ilustración 5-13 Correlación horaria sensor 3 SPS_30 473B con monitor de referencia, Estación Ráquira 84
Ilustración 5-14 Porcentaje de datos capturados en el monitoreo de la Estación Ráquira 85
Ilustración 5-15 Correlación diaria sensor 1 SPS_30 4A3A con monitor de referencia, Estación Ráquira 86
Ilustración 5-16 Correlación diaria sensor 2 SPS_30 473B con monitor de referencia, Estación Ráquira 87
Ilustración 5-17 Correlación diaria sensor 3 SPS_30 4E2E con monitor de referencia, Estación Ráquira 88
Ilustración 5-18 Correlación horaria sensor SPS30 4A3A con sensor de temperatura 89
Ilustración 5-19 Correlación horaria sensor SPS30 4E2E con sensor de temperatura 89
Ilustración 5-20 Correlación horaria sensor SPS30 4A3A con sensor de humedad 90
Ilustración 5-21 Correlación horaria sensor SPS30 4E2E con sensor de humedad 90
Ilustración 5-22 Perfiles verticales de calidad del aire, Municipio de Mosquera 25 de febrero de 2022 91
Ilustración 5-23 Perfiles verticales de calidad del aire, Municipio de Mosquera 26 de febrero de 2022 91
Ilustración 5-24 Perfiles verticales de calidad del aire, Municipio de Mosquera 27 de febrero de 2022 92
Ilustración 5-25 Perfiles verticales de calidad del aire, Municipio de Mosquera 28 de febrero de 2022 92
Ilustración 5-26 Perfiles verticales de calidad del aire, Municipio de Mosquera 1 de marzo de 2022 92
Ilustración 5-27 Perfiles verticales de calidad del aire, Municipio de Mosquera 2 de marzo de 2022 93

Ilustración 5-28 Perfiles verticales de calidad del aire, Municipio de Mosquera 3 de marzo de 2022 93
Ilustración 5-29 Perfiles verticales de calidad del aire, Municipio de Mosquera 4 de marzo de 2022 93

Lista de tablas

Pág.

Tabla 1-1 Herramientas típicas de monitoreo a distintitas alturas, adaptado [7] 3
Tabla 1-2 Uso de equipos *UAV* para el monitoreo de calidad del aire, adaptado [14] 7
Tabla 1-3 Principales diferencias *drone*s de ala fija y multirrotor 8
Tabla 1-4 Tipos de validaciones de sensores según EPA, adaptado [49], [50]..... 11
Tabla 2-1 Criterios de evaluación deseados [49]..... 15
Tabla 2-2 Especificaciones Matrice 600 pro [52], [53] 16
Tabla 2-3 Características puntos de monitoreo con *UAV.* Elaboración propia..... 17
Tabla 2-4 Valores y criterios para Coeficiente de correlación..... 20
Tabla 2-5 Rutina de cálculo utilizada para la definición de la segmentación de capas en la atmosfera..... 22
Tabla 3-1 Parámetros de correlación para los sensores evaluados en la estación de Ráquira con temporalidad horaria 28
Tabla 3-2 Parámetros de correlación para los sensores evaluados en la estación de Ráquira con temporalidad diaria 28
Tabla 3-3 Error monitoreo validación estación de Ráquira. 28
Tabla 3-4 Parámetros de correlación para los sensores evaluados en la estación de DLIA con temporalidad horaria 30
Tabla 3-5 Parámetros de correlación para los sensores evaluados en la estación de DLIA con temporalidad diaria..... 30
Tabla 3-6 Parámetros de correlación para los sensores evaluados en la estación de DLIA con temporalidad minutal 31
Tabla 3-7 Error monitoreo validación estación de DLIA..... 33
Tabla 3-8 Criterios de aceptación de los sensores según monitoreo realizado en la estación Ráquira 33

Tabla 3-9 Criterios de aceptación de los sensores según monitoreo realizado en la estación DLIA 34
Tabla 3-10 Diferencia de concentraciones en ascenso y descenso en los vuelos 38
Tabla 3-11 Criterios de aceptación de los sensores en asenso implementados en UAV basado en la comparación con la estación DLIA 52
Tabla 3-12 Alturas y espesores usados por la SDA para el modelamiento de calidad del aire 55

Lista de Símbolos y abreviaturas

Abreviatura	Término
CAR	Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca CAR
LOESS	*Local Regression*
OMS	Organización Mundial de la Salud
$PM_{2.5}$	Material particulado menor a 2.5 micrómetros
PM_{10}	Material particulado menor a 10 micrómetros
SDA	Secretaria Distrital de Ambiente
UAV	*Unmanned Aerial Vehicle*

Introducción

La calidad del aire es una de las fuentes principales de afectaciones a los problemas cardio-respiratorios a nivel mundial, donde la exposición en largos periodos de tiempo puede incrementar la mortalidad hasta en un 15% [1]. En el caso de exposiciones de corta duración, un incremento de 10µg/m^3 de PM_{10} se ve reflejado en un incremento del 0.5% en la mortalidad diaria. Mientras que para $PM_{2.5}$ un incremento igual representa un incremento de 1.5% [2]. La OMS reporto que para el año 2016, se pueden atribuir cerca de 7 millones de muertes a nivel mundial [3]. En el Caso colombiano la OMS atribuye entre 10400 y 15000 muertes para el mismo periodo de tiempo. El instituto nacional de salud reportó para el año 2019, 137549 muertes (por mala calidad del agua, aire y exposición a combustible pesados) [4]. Para la ciudad de Bogotá se estimó que 3219 muertes estaban relacionadas con la mala calidad del aire, generando costos estimados en 4.2 billones de pesos, o 2.5% del PIB de la ciudad.

Los altos niveles de contaminación atmosférica en términos de material particulado están asociados a un incremento de otras enfermedades. Un incremento de 10% en la concentración media anual $PM_{2.5}$, se asocia con un incremento de 6% de cáncer cardiopulmonar y 8% de cáncer pulmonar [5]. Adicional a los motivos de salud, la mala calidad del aire genera un costo en salud. Tomando el enfoque de Valor Estadístico de Vida, el impacto de la mala calidad del aire suma un valor de 5.7 billones de pesos anuales o 1.1.% del PIB del 2009, de los cuales el 79% está relacionado a mortalidad.[6].

Para lograr una disminución del material particulado en cualquier zona, es necesario contar con una serie de acciones que comprende desde el establecimiento de políticas públicas, hasta la restricción de actividades que afecten a la calidad del aire. Colombia cuenta con la Política de Prevención y Control de la Contaminación del Aire, la cual tiene como objetivo “Impulsar la gestión de la calidad del aire en el corto, mediano y largo plazo, con el fin de alcanzar los niveles de calidad del aire adecuados para proteger la salud y el bienestar humano, en el marco del desarrollo sostenible”.

Adicional a estas políticas, es necesario contar con herramientas técnicas que permitan la correcta toma de decisiones. Algunas de estas herramientas utilizan las mediciones directas para determinar la calidad del aire y así las acciones a implementar frente a eventos de contaminación. Otras herramientas computacionales utilizan distintos algoritmos y método para estimar la calidad del aire. Algunas de estas últimas, pueden ir un paso más adelante y estimar a futuro como la calidad del aire puede afectar una población. Sin embargo, las políticas públicas siempre operaran mejor si se utilizan todo tipo de herramientas y más aún si estas trabajan de la mano

Este trabajo presenta una nueva forma de medir el material particulado en la Sabana de Bogotá, que puede fortalecer la toma de decisiones con mediciones directas, y mejorar el entendimiento del comportamiento de la calidad del aire para mejorar los modelos de pronóstico.

Para ello se plantea. 1) Evaluar la aptitud de los sensores de material particulado para su uso en sistemas UAV 2) Evaluar el desarrollo diario de perfiles verticales de concentración de material particulado y variables meteorológicas y 3) Interpretar las diferencias encontradas entre los perfiles verticales obtenidos. Debido a .la operación del teleférico como transporte público y las indicaciones del área técnica no es posible realizar la instalación de los sensores. En su lugar se profundiza las características de los perfiles obtenidos y como estos realizan un aporte importante a las herramientas de modelación disponibles.

1. Generalidades

1.1 Perfiles verticales de calidad del aire

El desarrollo de mediciones de material particulado o condiciones atmosféricas se ha efectuado con distintas tecnologías, que permiten la captura de información de distintas maneras. La Tabla 1-1presenta algunas de estas herramientas.

Tabla 1-1 Herramientas típicas de monitoreo a distintitas alturas, adaptado [7]

Herramienta	***Forma de medición***	**Altura de monitoreo**	**Consideraciones**
Estaciones fijas	*In situ*	0 a 50 m	Permiten una temporalidad máxima, sin embargo, su alcance es limitado
Satélites	Remota	1 km a 100km	Limitados por la presencia de nubosidades
Radio sondas	*In situ*	0km a 30km	Operados dos veces al día, espaciamiento típico en radiosondeos de 300km
Aeronaves comerciales	*In situ*	0km a 10 km	Limitado a aproximación de aeropuertos
Radares meteorológicos	Remota	0km a 10 km	Requieren la presencia de nubosidades, limitados por la presencia de formaciones montañosas

A pesar de la existencia de las radiosondas, las cuales pueden transportar sensores de meteorología y de calidad del aire, su despliegue y cobertura espacial es muy baja. Por este motivo existe una ausencia de información capturada in situ [7] entre los 50 metros y los dos kilómetros. Esta ausencia de información es marcada en zonas remotas y regiones menos desarrollas del mundo [8][7]. Esta ausencia de información se presenta como uno de los retos que deben ser abordados para mejorar el desarrollo de modelos meteorológicos y por consiguiente los modelos de calidad del aire [9].

Es por estos motivos que se debe profundizar en el estudio de los perfiles verticales de calidad del aire con herramientas de bajo costo. Los cuales pueden lograr la diversificación de los monitoreos espacial y temporal.

1.1.1 Radiosondeos

Para la ciudad de Bogotá se elaboran radiosondeos por parte Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM; estos monitoreos se realizan entre los 2560msnm y los 28000 msnm (dependiendo de las condiciones diarias), típicamente su resolución varia con la altura. La Ilustración 1-1 muestra la temperatura atmosférica obtenida con los radiosondeos del 12 a 14 de agosto de 2021 realizados en la ciudad de Bogotá. La Ilustración 1-2, muestra la diferencia de altura entre cada una de las mediciones realizadas en el mismo periodo de tiempo.

En los radiosondeos llevados a cabo en la ciudad de Bogotá, capturan típicamente dos o tres puntos en los primeros 500 metros de ascenso. Esto conlleva a una caracterización podo detallada en estos primeros metros, que es donde se centra el interés del modelamiento y la emisión de alertas a la población por eventos de contaminación del aire. Esta deficiencia puede ser cubierta con otras tecnologías de monitoreo, que permitan una mejor resolución temporal y espacial. Los sensores LIDAR o los equipos *drone* son dos técnicas que pueden facilitar este monitoreo.

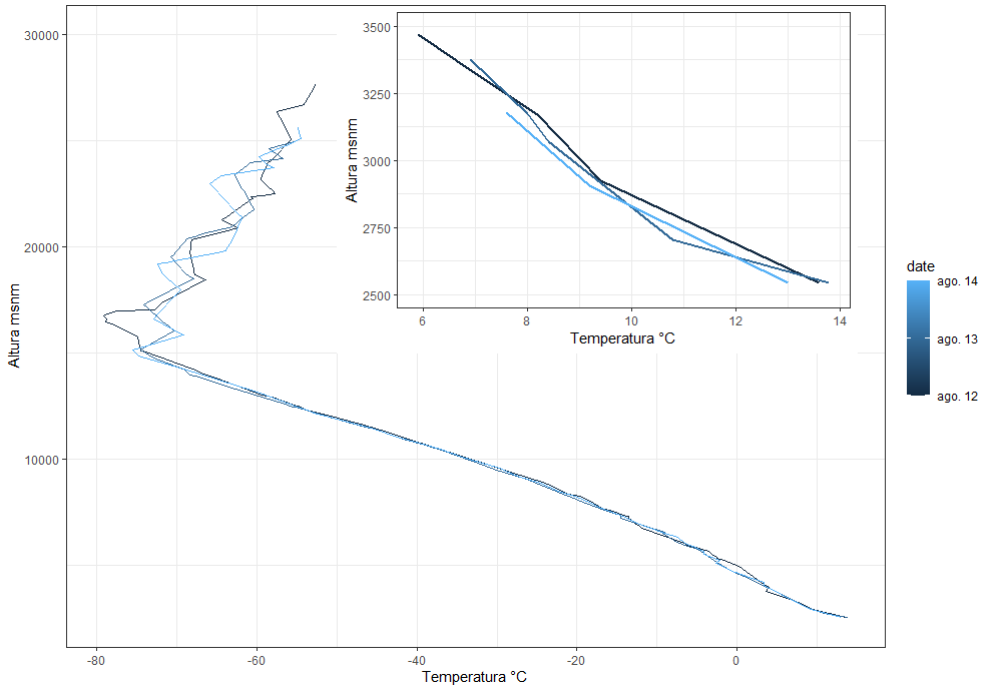


Ilustración 1-1 Radiosondeos 12 a 14 de agosto de 2021. Adaptado [10]. [11]

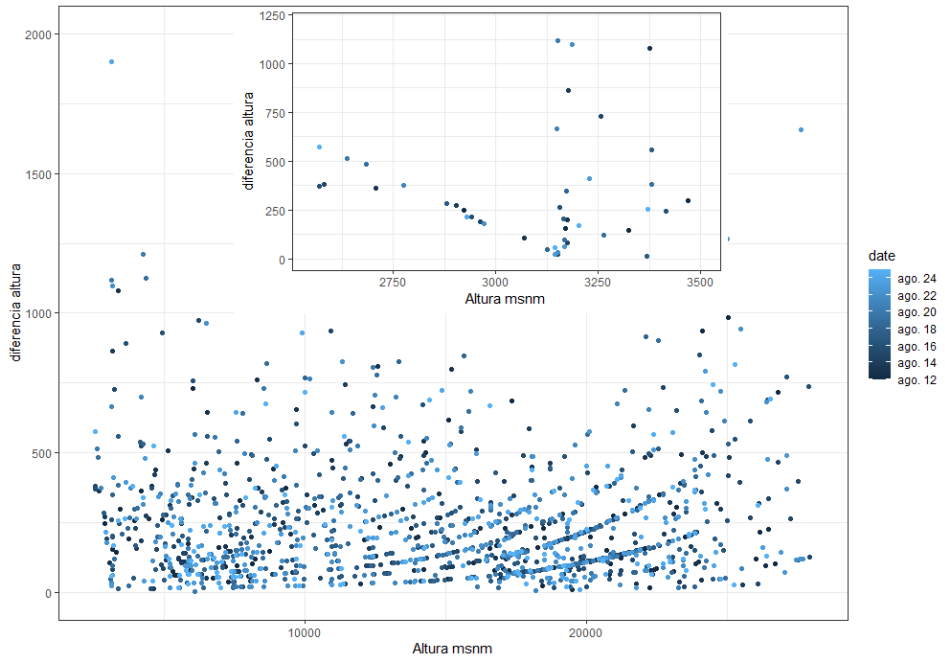


Ilustración 1-2 Diferencias en alturas de las mediciones entre los radiosondeos. Adaptado [11] [10]

1.1.2 UAV o *Drone*

El termino drone o *UAV* (*Unmanned Aerial Vehicle* por sus siglas en inglés). usualmente se refiere a aeronaves sin piloto, pilotadas remotamente y que tiene la capacidad de seguir una ruta especifica o permanecer estacionarios sin intervención humana. Para lograrlo estos sistemas utilizan equipos GPS y unidades inerciales o IMU (*IMU Inertial Measurement Unit*).Esto permite realizar operaciones que tienen una mejor relación costo beneficio respecto a la operación de otro tipo de aeronaves[12] .

El uso de *UAV* o *drones* ha crecido ampliamente en gran cantidad de aplicaciones. Las más comunes comprenden el uso en la milicia, el mapeo, operaciones de búsqueda y rescate, seguimiento remoto y envío de mercancía. Todo esto se ha logrado dada la gran versatilidad que tiene operar estos equipos en forma remota y el aumento del rendimiento en horas de vuelo y carga transportada. Estas características permiten usar estos equipos como una plataforma para el trasporte de sensores y medición de calidad del aire con los mismos.

- Monitoreo de calidad del aire con *UAV*

El monitoreo de calidad del aire, así como cualquier monitoreo, requiere el uso de equipos que sean confiables y representativos de la realidad. En los monitoreos de calidad del aire existen muchos equipos que cumplen con estas condiciones, pero no son fácilmente acoplables a equipos *UAV* Es por esta razón, que muchos de los desarrollos adelantados se han enfocado en la disminución del tamaño de los equipos, disminución del peso y requerimiento energético.

El uso de equipos *UAV* como plataforma para los equipos de calidad del aire se inició en el año 2006 [13], donde el parámetro de estudio era el dióxido de carbono. Desde ese momento se ha ido expandiendo a más variables como lo son condiciones meteorológicas (humedad, velocidad y dirección del viento), material particulado (PM_{10} y $PM_{2.5}$), gases (NO_2, SO_2). Lambey y Prasad, recopilaron información monitoreos atmosféricos usando *UAV* (Tabla 1-2). Debido a las características de los equipos *UAV*, los estudios se han enfocado en los primeros 1000 metros, donde se puede caracterizar y estudiar la capa límite planetaria o PBL.

Los equipos *drone* se dividen en dos categorías, multirrotor y ala fija. Para el monitoreo de calidad del aire las principales características y diferencias se registran en la Tabla 1-3. La tasa de ascenso es la característica principal para el uso de multirrotores en el estudio de los perfiles verticales.

Tabla 1-2 Uso de equipos *UAV* para el monitoreo de calidad del aire, adaptado [14]

Año	**Parámetro de estudio**	**Tecnología equipos**	**Referencia**
2021	PM1, PM2.5 PM10, H2S	Hexacóptero	[15]
2020	PM1, PM2.5 PM10	Hexacóptero	[16]
2020	PM2.5 PM10	Hexacóptero	[17]
2020	PM2.5 , BC	Cuadricóptero	[18]
2020	CO2, CO, NH3, SO2, PM, O3, NO2	Multirrotor, cuadricóptero	[19]
2019	PM2.5, O3, black carbon, CO	Multirrotor, hexacóptero	[20]
2019	PM2.5, NO2	Multirrotor, hexacóptero	[21]
2019	PM2.5	Hexacóptero	[22]
2019	PM	Hexacóptero	[23]
2019	PM2.5	Cuadricóptero	[18]
2019	PM, NO2	Cuadricóptero	[21]
2018	PM2.5, PM10	Cuadricóptero	[24]
2018	PM2.5	Cuadricóptero	[25]
2018	PM2.5, BC	Ala Fija	[26]
2018	PM2.5	Ala Fija	[27]
2018	PM2.5	Cuadricóptero	[28]
2017	Particle number concentration (PNC)	Hexacóptero	[29]
2017	O2, CO2, O3, H2S, SO2, CO, NH3, NO2, C2H4, benzene, methylbenzene, PM2.5, PM10	Cuadricóptero	[30]
2017	PM10	Cuadricóptero	[31]
2017	CO, CO2, PM2.5	Hexacóptero	[32]
2017	PM1, PM2.5, PM10	Octocóptero	[33]

Año	Parámetro de estudio	Tecnología equipos	Referencia
2017	PM2.5, PM10, CO, NO, SO2, and O3.		[34]
2016	PM2.5, CO2	Cuadricóptero	[35]
2015	PM10, PM2.5	Cuadricóptero	[36]
2015	Partículas ultrafinas	Ala Fija	[37]
2015	Vertical variability of PM2.5	Ala fija	[38]
2015	Vertical distribution of PM2.5	Ala fija	[39]
2014	PM10, O3, NO2	Hexacóptero	[40]
2013	Vertical distribution of black carbon (BC)	Ala fija	[41]

Tabla 1-3 Principales diferencias *drone*s de ala fija y multirrotor

Característica	*Drone* ala fija	*Drone* multirrotor
Vuelo estacionario	No	Si
Tiempo de vuelo máximo	Hasta 3 horas	Hasta una hora
Carga	Hasta 6kg	Hasta 20 kg
Ascenso vertical	No	Si - 5 m/s

Una de las mayores ventajas del uso de equipos *UAV* es su facilidad de despliegue, logrando así el realizar mediciones en zonas donde el uso de monitores convencionales no es posible [20]. Esto permite solucionar aspectos como la baja resolución espacial que presentan los monitores convencionales. En contra parte la resolución temporal de los *drone*s se ve ampliamente superada por la de los monitoreos de estaciones fijas [21].

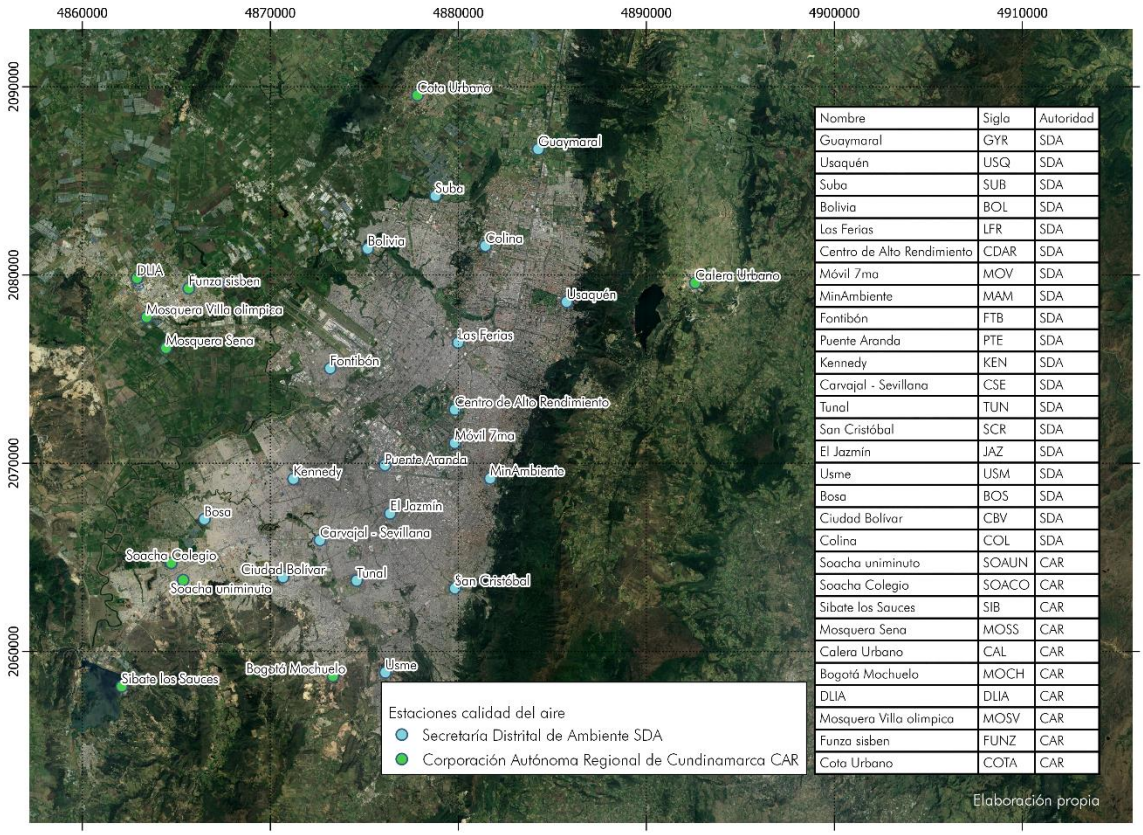
Una de las consideraciones más importantes en el monitoreo mediante el uso de *drones* es la alteración aerodinámica que genera las partes móviles del propio equipo. Para equipos hexacópteros se ha encontrado que las alteraciones causadas por el mismo, pueden llegar a ser de hasta 8 metros en el eje axial [40]. Otros autores reportan que el efecto de lavado o *downwash* limita la ubicación de los sensores en hasta 3 metros; y hasta 1.2 metros [42]. Esta afectación ya ha sido estudiada y se determinó que es posible utilizar sensores se bajó costo implementados en equipos *UAV* para la medición de perfile verticales de calidad del aire [17], con coeficientes de determinación de 0.97 para vuelos estacionarios.

En la implementación de los sensores se han estudiado distintos parámetros y configuraciones. Para la medición de variables termodinámicas, se ha reportado que el aislamiento a la radiación solar es de mayor importancia que la ubicación de estos [43]. Los sensores que se encuentran asilados en ductos son una solución efectiva, sin embargo estos sensores pueden aumentar en más de un orden de magnitud el tiempo de respuesta del mismo, por lo que pueden no ser una solución efectiva para la medición de perfiles verticales [44].

Diferentes simulaciones han buscado determinar el impacto de la velocidad de ascenso de los equipos multirotor y el tiempo de respuesta de los sensores. En estos se encuentra que le error en las mediciones escala directamente con ambas variables de estudio. Los errores en la estimación de la temperatura en la aparte próxima a la superficie son menores a 0.5 K, si la velocidad de ascenso es menor a 10m/s y el sensor usados tiene un tiempo de respuesta menor a 5 segundos [45].

1.2 Sabana de Bogotá y calidad del aire

La Sabana de Bogotá es una de las áreas más densamente pobladas de Colombia, esto conlleva retos típicos de grandes urbes. La calidad del aire ha sido una de las preocupaciones más grandes para la población, donde lo perciben como el principal problema ambiental el 51% de las personas [46]. Por estos motivos en la ciudad de Bogotá y alrededores cuenta con una red de calidad del aire robusta y en aumento.



Nombre	Sigla	Autoridad
Guaymaral	GYR	SDA
Usaquén	USQ	SDA
Suba	SUB	SDA
Bolivia	BOL	SDA
Las Ferias	LFR	SDA
Centro de Alto Rendimiento	CDAR	SDA
Móvil 7ma	MOV	SDA
MinAmbiente	MAM	SDA
Fontibón	FTB	SDA
Puente Aranda	PTE	SDA
Kennedy	KEN	SDA
Carvajal - Sevillana	CSE	SDA
Tunal	TUN	SDA
San Cristóbal	SCR	SDA
El Jazmín	JAZ	SDA
Usme	USM	SDA
Bosa	BOS	SDA
Ciudad Bolívar	CBV	SDA
Colina	COL	SDA
Soacha uniminuto	SOAUN	CAR
Soacha Colegio	SOACO	CAR
Sibate los Sauces	SIB	CAR
Mosquera Sena	MOSS	CAR
Calera Urbano	CAL	CAR
Bogotá Mochuelo	MOCH	CAR
DLIA	DLIA	CAR
Mosquera Villa olimpica	MOSV	CAR
Funza sisben	FUNZ	CAR
Cota Urbano	COTA	CAR

Ilustración 1-3 Estaciones de monitoreo de la calidad del aire en la ciudad de Bogotá y alrededores. Adaptado[47], [48].

Todas las temáticas ambientales de la ciudad de Bogotá y alrededores, es manejada por dos organismos independientes, la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA) y la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR). LA SDA administra y opera 19 estaciones [47] mientras que la CAR administra 10[48].

1.3 Sensores de bajo costo

El monitoreo de calidad del aire cuenta con dos objetivos principalmente, el monitoreo para comparación con normatividad y el monitoreo para obtener información suplementaria. Para poder generar información para cada una de estas aplicaciones se deben tener consideraciones sobre los rangos de medición y el rendimiento de los equipos a utilizar. La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), ha establecido los protocolos que se deben seguir los equipos para poder generar información con fines normativos, los cuales se encuentran establecidos en el Código de Regulaciones

Federales, Titulo 40 Partes 50, 53 y 58. Para los sensores que no siguen los estándares anteriores, la EPA ha publicado el Protocolo de prueba de rendimiento, métricas y valores objetivo para sensores de aire de material particulado fino [49].

Tabla 1-4 Tipos de validaciones de sensores según EPA, adaptado [49], [50]

Característica	**Sensores con fines normativos**	**Sensores de información suplementaria y monitoreos informativos**
Normatividad aplicable	*Title 40, Parts 50 and 53 of the Code of Federal Regulations*	*Performance Testing Protocols Metrics. and Target Values for Fine Particulate Matter Air Sensors*
Uso principal	Comparación para la determinación de normativa ambiental	Caracterización de un contaminante en tiempo y área especifico Análisis de diferencias de las características entre distintas Cambios de concentraciones en largos periodos de tiempo
Parámetros objetivo	Mediciones ambientales de O_3, NO_2, CO, SO_2, $PM_{2.5}$, PM_{10} Y Pb	Mediciones ambientales de $PM_{2.5}$

2. Metodología

2.1 Evaluación de la aptitud de los sensores de material particulado

Para evaluar los sensores a usar, se usará la metodología recomendada por la EPA. La cual tiene como objeto comparar el rendimiento de los sensores de calidad del aire para aplicaciones que no requieren comprar con la normatividad. Como lo puede ser caracterizaciones o análisis de tendencias. Para ello la EPA recomienda dos procedimientos, uno que consiste en instalar los sensores en un ambiente donde se conoce completamente las condiciones, como la temperatura y la humedad el aire.

La segunda metodología consiste en la comparación con monitoreos de referencia o FRM/FEM, los cuales cumplen estándares de la EPA para la emisión de información ambiental que puede ser usada para tomar decisiones de carácter legal. Esto implica el uso de estándares trazables, mantenimientos preventivos, verificaciones y demás herramientas de control establecidas por el fabricante. Es esta segunda metodología la usada para determinar la aptitud de los sensores de calidad del aire.

2.1.1 Sensor usado

El sensor utilizado es el sensor SPS-30 de la marca Sensirion. Este usa el principio de dispersión laser, con un láser de 660nm para la medición. El fabricante reporta una precisión de ±10 µg/m^3 para el PM2.5 en el rango de 0 a 100 ±10 µg/m^3; mientras, que para el rango de 100 a 1000 µg/m^3 el error se estima como ±10 %m.v. Adicionalmente, el fabricante reporta que el valor máximo de la derivada para un periodo de hasta un año es de 1,25 µg/m^3.

2.1.2 Instalación de sensores

Para realizar la comparación con un equipo de referencia, se requiere el uso de tres sensores idénticos. Estos deben ser instalados junto a una estación de referencia, la cual debe cumplir con todos los lineamientos para el reporte de información de calidad del aire.

La instalación de los sensores se debe realizar dentro de 20 metros del equipo FEM, y a una altura equivalente a la toma de aire de este, con una diferencia máxima de ±1m. Esta instalación se realiza por un periodo de 15 días

La comparación se realiza en el municipio de Ráquira.

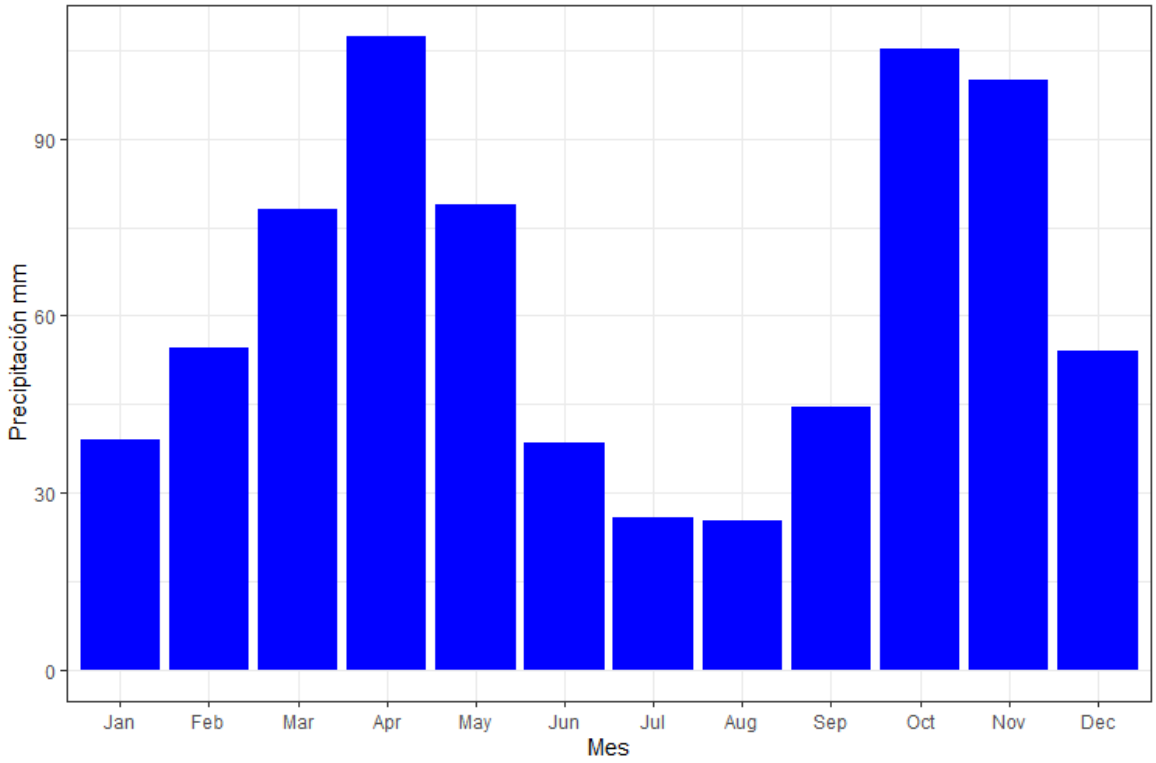


Ilustración 2-1 Precipitaciones mensuales Ráquira, estación La Candelaria – CAR [51]

Para la evaluación el monitoreo es llevado a cabo en la estación de Calidad del Aire del municipio de Ráquira y la estación de calidad del aire de la Dirección de Laboratorio e Innovación Ambiental en Mosquera. Ambas estaciones pertenecen a la Red de Calidad del Aire de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca CAR

2.1.3 Operación de sensores

La operación de los sensores se realiza por un periodo de 15 días. Se usan dos sensores co-posicionados con el monitor de referencia. Se registra la temperatura, humedad relativa y otras variables que el sensor pueda usar, como por ejemplo el índice de refracción, la composición química de las partículas. Cada dato valido debe encontrarse registrado mínimo en el 75% de las mediciones origínales desde el cual se calcula.

2.1.4 Criterios de evaluación

Promedio diario

$$\boldsymbol{x_{kdj} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} C_{ij}} \tag{2.1}$$

Promedio del montaje

$$\boldsymbol{\overline{x_k} = \frac{1}{M}\sum_{j=1}^{M}\left[\frac{1}{N}\sum_{d=1}^{N} x_{dj}\right]} \tag{2.2}$$

Precisión

$$\boldsymbol{SD = \sqrt{\frac{1}{(N*M)-1}\sum_{j=1}^{M}\left[\sum_{d=1}^{N}\left(x_{dj}-\overline{x_d}\right)^2\right]}} \tag{2.3}$$

Error de sesgo (bias) y linealidad

$$\boldsymbol{y = mx + b} \tag{2.4}$$

Error cuadrático medio

$$\boldsymbol{RMSE = \sqrt{\frac{1}{(N*M)}\sum_{j=1}^{M}\left[\sum_{d=1}^{N}\left(x_{dj}-R_d\right)^2\right]}} \tag{2.5}$$

$$\boldsymbol{NRMSE = \frac{RMSE}{\overline{R_d}} * 100} \tag{2.6}$$

Donde

$\boldsymbol{C_{ij}}$ es la concentración para el instrumento j en el tiempo i

$\boldsymbol{M}$ es el número de instrumentos idénticos operados

$\boldsymbol{N}$ es el número de intervalos de tiempo durante el cual lo instrumentos operaron y retornaron valores validos

Tabla 2-1 Criterios de evaluación deseados [49]

Métrica		**Objetivo**	**Calculo**
Precisión	Desviación estándar (SD)	≤5 µg/m^3	(**2.3**)
	o CV (%)	≤30%	(**2.3**)
Error de sesgo bias	Pendiente	1.0±0.35	(**2.4**)
	Intercepto (µg/m^3)	-5 ≤b≤5 µg/m^3	(**2.4**)
Linealidad	R^2	≥0.70	(**2.4**)
Error	RMSE o NRMSE	RMSE≤7 µg/m^3 o NRMSE≤30%	(**2.5**) y (**2.6**)

Estos criterios son evaluados en cada despliegue y desarrollo realizado por cada sitio de monitoreo.

2.2 Medición de perfiles verticales

2.2.1 Monitoreo con *UAV*

- Equipo utilizado

El monitoreo de perfiles de calidad del aire se realiza con un *drone* hexacóptero de referencia Matrice 600 pro, de la marca DJI©. El diseño de las mediciones tiene en cuenta las limitaciones del equipo, como lo son la carga útil, la velocidad, temperatura de operación y la altura de operación (techo de operación). Las especificaciones más relevantes para la operación desarrollada se presentan en la Tabla 2-2. El equipo utilizado

no permite la operación en condiciones lluviosas; lo cual es tenido en cuenta para la recolección de la información.

Tabla 2-2 Especificaciones Matrice 600 pro [52], [53]

Especificación	Valor mínimo	Valor máximo
Carga paga (carga útil)	-	5.5 kg
Velocidad vertical en ascenso	-	5 m/s
Velocidad vertical en descenso	-	3 m/s
Velocidad horizontal	-	18 m/s
Temperatura de operación	-10 °C	40 °C
Altitud de operación	0m	~2500m (extensible) [i]
Altura de operación	0	500m [ii]
Tiempo de vuelo estacionario [iii]	18 minutos (6.5 kg de carga)	40 minutos (sin carga)

En este equipo se instalan los sensores de bajo costo para realizar el monitoreo. Se instalan 4 sensores, dos en la parte superior y dos en la parte inferior, con el objeto de determinar diferencias causadas por el lugar de instalación de los sensores.

- Ubicación de monitoreos

Los monitoreos se llevan a cabo en dos sitios de la Sabana de Bogotá. El primero en el municipio de Mosquera, en la Sabana Centro, y el segundo en la ciudad de Bogotá, frente al Parque Nacional. Los monitoreos conducidos en el municipio de Mosquera se realizan por 8 días consecutivos, desde las 5:30 de la mañana, justo antes del amanecer. En la

[i] La altitud máxima reportada por el fabricante se obtiene al utilizar la configuración de fábrica. Sin embargo, la operación a altitudes superiores a 2500 metros se puede llevar a cabo sin desconocer la disminución de rendimiento.
[ii] La altura de operación se encuentra restringida por software
[iii] El tiempo de vuelo estacionario se basa en volar a 10 m sobre el nivel del mar en un entorno sin viento y aterrizar con un nivel de batería del 10 %.

ciudad de Bogotá, se realizan por un día debido a las restricciones que existen en la ciudad para operar este tipo de equipos.

Tabla 2-3 Características puntos de monitoreo con *UAV.* Elaboración propia.

Característica	**Punto de monitoreo Mosquera**	**Punto de monitoreo Bogotá**
Obstáculos cercanos	Sin obstáculos	Edificios
Topografía	Planicie, sin obstáculos a menos de un kilometro	Cadena montañosa local a menos de 500 metros
Fuentes de emisión cercanas	Industriales y vehiculares intermunicipales	Vehiculares urbanos, quema de material vegetal[iv]
Observaciones	-	Edificios de hasta 80 metros de altura

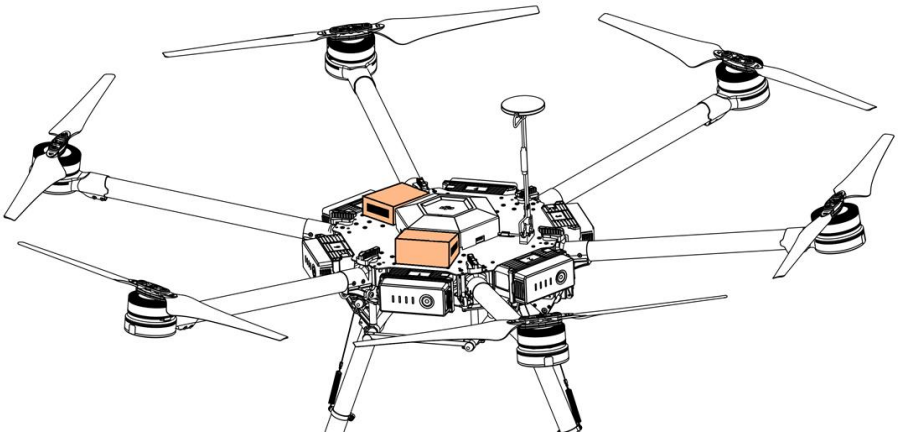


Ilustración 2-2 Esquema de monitoreo sensores SPS30 en sistema *UAV* Matrice 600. Tomado y adaptado de https://www.dji.com/matrice600

- Obtención de coordenadas

Para obtener la posición del sensor, se utiliza la coordenada del equipo *UAV*. Este equipo utiliza las constelaciones GPS y GLONNAS, por lo que usualmente la posición del equipo está definida por más de 9 satélites. Esto es fundamental pues evita posteriores errores en la interpretación de la altura. Esta se obtiene idealmente mientras los valores de HDOP (*Horizontal dilution of precision*) son menores a un valor menor a dos. Esto se asegura cuando el equipo vuela en modo de posicionamiento o P-GPS. Bajo estas condiciones, el

[iv] En la fecha de los monitoreos realizados se encontraban quemas de material vegetal a 200 metros de distancia. Esta quema controlada se repite cada hora y es realizada por la población migrante ubicada en el Parque Nacional.

equipo obtiene una exactitud de ±0.5 m en la altura[v]. Para obtener la altura sobre el nivel del suelo, se normaliza a la altura que el equipo registra justo antes de iniciar la operación.

Los monitoreos se realizan cada 20 minutos, a una velocidad de ascenso de 2m/s, con una distancia total de 500 metros sobre el nivel del suelo, teniendo en cuenta las especificaciones técnicas del equipo y de las ideales para disminuir los errores causados por el tiempo de respuesta de los sensores. De esta manera se obtienen 6 perfiles de calidad del aire por hora, ascendentes y el posterior descenso. Lo monitoreos son realizados iniciando a las 5:10 am en cada uno de los puntos de monitoreo hasta las 9:10 am. Las coordenadas y concentraciones obtenidas son procesadas y son cruzadas a través de la hora del GPS y de hora de captura.

2.3 Evaluación de implementación de sensores en UAV

Para lograr el uso de los sensores en UAV y conocer el impacto de la medición en esta plataforma, los vuelos se desarrollan junto a una estación de referencia.

2.3.1 Ubicación monitoreos

Los monitoreos se desarrollan en la estación de monitoreo de calidad del aire de la Dirección de Laboratorio e Innovación Ambiental, ubicada en el municipio de Mosquera. La estación cuenta con el equipo *Teledyne* T640 para el monitoreo de PM2.5. La admisión del aire de la estación se encuentra a 20 metros sobre el nivel del suelo.

2.3.2 Datos para validación de sensores en *UAV*

Para determinar la valides de los datos de calidad del aire capturados con el drone se seleccionan las concentraciones obtenidas en un rango de 15 a 25 metros de altura de los vuelos realizados siguiendo la metodología de la sección 2.2. Este rango se toma como el rango en el cual las mediciones capturadas son las mismas que las medidas por la estación de referencia. Esto se toma de esta manera pues las mediciones evaluadas son tomadas del monitoreo del perfil vertical, momento en el cual el UAV se encuentra en movimiento.

[v] Tomado de https://www.dji.com/matrice600-pro/info#specs

Este enfoque difiere al de otros autores [17] donde se ha evaluado el impacto de la medición con sensores instalados en UAV a una altura fija (sin movimiento).

Los vuelos son realizados a una distancia de 10 metros horizontales (ver Ilustración 2-3) respecto a la admisión de aire para el monitoreo de referencia. Los valores analizados corresponden únicamente a los monitoreos realizados en ascenso.

Ilustración 2-3 Derecha, estación de calidad del Aire DLIA. Izquierda *UAV* con sensores. 10 metros de distanciamiento entre la estación y el *UAV*

2.3.3 Análisis estadístico a la altura de la estación

Los datos obtenidos para la estación de monitoreo y del equipo UAV son procesados y correlacionados mediante las métricas del coeficiente de correlación de Pearson y el coeficiente de determinación, el cual, para regresiones lineales, es el cuadrado de coeficiente de correlación.

Coeficiente de correlación de Pearson

$$\rho_{X,Y} = \frac{\mathbf{COV}(X,Y)}{\sigma_X \sigma_y} \tag{2.7}$$

Los criterios para determinar el tipo de correlación según el coeficiente de correlación de Pearson se presentan en la Tabla 2-4:

Tabla 2-4 Valores y criterios para Coeficiente de correlación

Correlación	Coeficiente de correlación
Inexistente	0 a 0,1
Débil	0,1 a 0,3
Moderada	0,3 a 0,5
Fuerte	0,5 a 1.00

2.4 Interpretación de perfiles verticales

Los perfiles verticales se estudian en secciones de 10 metros, ya que de esta manera se asegura que todos los sensores reporten al menos un dato en esta franja

2.4.1 Variabilidad de perfiles

Para determinar la variabilidad de los perfiles obtenidos se utilizará el delta acumulado de las mediciones, el cual es obtenido mediante la ecuación (**2.8**)

$$\boldsymbol{\Delta C_{Acumulado}} = \sum_{\boldsymbol{k=1}}^{\boldsymbol{N}} |C_{k+1} - C_k| \tag{2.8}$$

Donde:

C_k es la concentración obtenida a la altura k

Este delta de concentración acumulado de la concentración obtenida determina la sumatoria de las diferencias consecutivas para cada uno de los perfiles. De esta manera se obtiene una medida cuantitativa para desagregar los perfiles que presentan mayor variabilidad

2.4.2 Segmentación de perfiles verticales

Para obtener las segmentaciones de la atmosfera se realiza un ajuste del promedio obtenido por los diferentes sensores. La regresión utilizada es LOESS (*Locally estimated scatterplot smoothing* por sus siglas en inglés) [54]. Este método asume que la regresión es localmente lineal. Es así como, en cada punto evaluado, se utiliza una fracción de los datos totales, los cuales están más cerca. Para los análisis realizados se eligió realizar el

promedio con el 35% de los datos. Adicionalmente es importante resaltar que el ajuste es ponderado teniendo en cuenta la distancia de los puntos seleccionados respecto al punto de estudio

Para realizar la segmentación de los datos, se utiliza la primera derivada; esta es calculada con el método de diferencias finitas centradas ecuación (2.9) , el cual es un promedio entre las diferencias finitas hacia adelante ecuación (2.10) y diferencias finitas hacia atrás, ecuación (2.11). Sin embargo, en el dato inicial y final se utiliza la derivada hacia adelante y la derivad hacia atrás. [55]

$$\boldsymbol{f'(x) \approx \frac{f(x+h) - f(x-h)}{2h}\ ; h > 0} \tag{2.9}$$

$$\boldsymbol{f'(x) \approx \frac{f(x+h) - f(x)}{h}\ ; h > 0} \tag{2.10}$$

$$\boldsymbol{f'(x) \approx \frac{f(x) - f(x-h)}{h}\ ; h > 0} \tag{2.11}$$

Se utiliza el criterio de primera derivada para determinar en qué secciones de la atmosfera están cambiando. Adicionalmente se define un rango para la primera derivada, en el cual se asume que la atmosfera no presenta cambios. Este rango es de 0.02 $\Delta(\mu g/m^3)/\Delta(m)$. Cambios superiores o inferiores a este valor se interpretan como incrementos o disminuciones de material particulado en la vertical. Dado que los sensores empleados cuentan con una resolución de 1µg/m^3, el máximo cambio de altura en el cual la sensibilidad del sensor afectara esta suposición es de 50 metros. Esto implica que zonas atmosféricas identificadas con un espesor mayor a 50 metros, pueden tener variaciones superiores a 1µg/m^3.

Para determinar si los puntos son máximos o mínimos se utiliza el criterio de la segunda derivada, este criterio es muy útil pues evalúa de manera local si el punto es máximo o mínimo. Esto evita evaluar derivadas posteriores o anteriores al punto de interés, lo cual computacionalmente es más conveniente. Esto sucede especialmente en transiciones

rápidas en la atmosfera, donde el criterio de la primera derivada se encuentra por fuera del rango establecido de 0.02 $\Delta(\mu g/m^3)/\Delta(m)$.

La rutina para definir si una altura es o no incluida en los cortes seleccionados se describe en la Tabla 2-5

Tabla 2-5 Rutina de cálculo utilizada para la definición de la segmentación de capas en la atmosfera.

Paso	**Evaluación**	**Verdadero**	**Falso**
1	Si altura es cero o máxima	Se incluye como zona de corte	Paso 2
2	Si criterio 1 es igual al criterio de la altura anterior o, criterio 2 muestra una inflexión y criterio 1 muestra que estamos en una zona de cambio	Se incluye como zona de corte	Paso 3
3	Si criterio 2 muestra una inflexión y la derivada 1 se encuentra en el rango de cero	Se incluye como zona de corte	Paso 4
4	Demas casos	La altura seleccionada presenta el mismo comportamiento de la altura posterior y anterior	

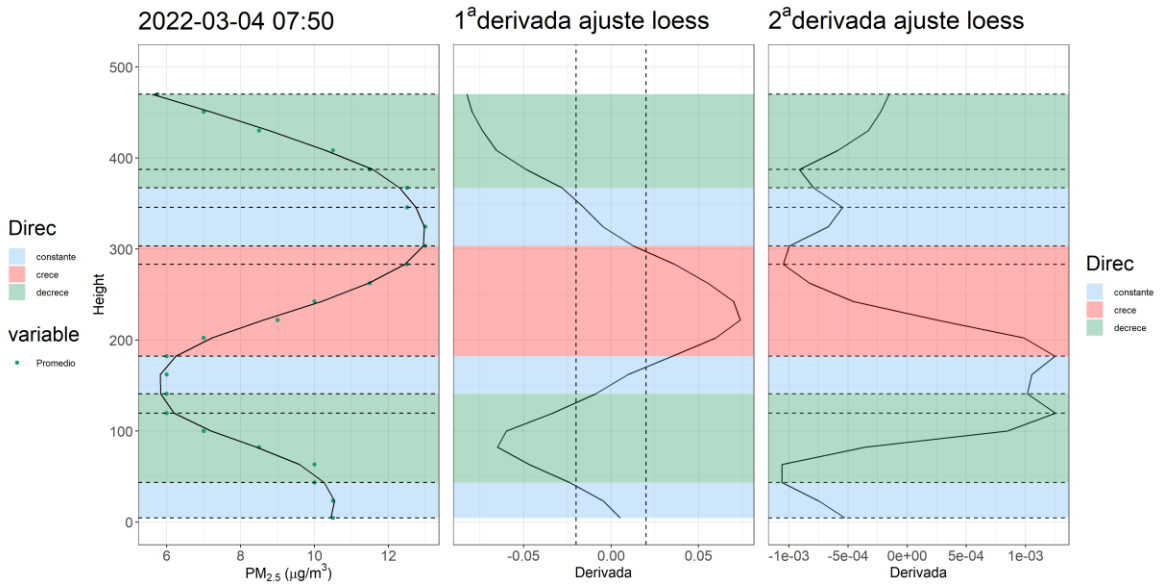


Ilustración 2-4 Perfiles verticales 4 de marzo, 7:50 am

Con los criterios descritos y la rutina ya explicada, se obtienen segmentaciones en la atmosfera como la de la Ilustración 2-4. En el primer cuadro de la ilustración, se presentan la concentración de los promedios obtenidos para cada altura disponible y el ajuste de la función LOESS. En el segundo recuadro, correspondiente a la primera derivada, se presenta los rangos sobre los cuales se asume un comportamiento Constante, de decrecimiento o crecimiento (en las concentraciones a medida que se asciende en altura). En el tercer recuadro se presenta la segunda derivada y los máximos y mínimos locales, los cuales ayudan a determinar qué tipo de comportamiento presenta la capa estudiada. En los tres recuadros se representa el resultado de las capas obtenidas, con el fin de presentar como cada criterio permite la definición de cada capa.

3. Resultados

3.1 Comparación de sensores

Los monitoreos con el objeto de realizar la verificación de los equipos utilizados fueron llevados a cabo en dos zonas, la primera en el municipio de Ráquira, entre los días 14/10/2021 y el día 30/10/2021. El segundo punto de comparación se realizó en el municipio de Mosquera, entre los días 17/02/2022 y el día 24/02/2022. Ambos monitoreos fueron llevados a cabo en estaciones de calidad del aire de la CAR.

El equipo utilizado para la medición de material particulado es un equipo de la Marca Teledyne © en su referencia T640. Este equipo permite la medición de $PM_{2.5}$ y PM_{10} en simultaneo. Estos equipos son propicios pues son equipos de referencia[56], los cuales, desde su fabricación y correcta operación, aseguran mediciones comparables. Este equipo usa el principio de dispersión de luz blanca en 90° (*90° white-light scattering*).

3.1.1 Instalación de sensores

En las estaciones de Ráquira y DLIA se realizó la instalación de los sensores en un mástil junto a la entrada de la muestra para el monitor de referencia (Ilustración 3-1 y Ilustración 3-2). Esta entrada se encuentra a 10 metros sobre el nivel del suelo para la estación de Ráquira y 18 metros para la estación de DLIA.

Ilustración 3-1 Instalación sensores de calidad del aire en la estación de Ráquira.

Ilustración 3-2 Instalación sensores de calidad del aire en la estación de DLIA

En la estación de Ráquira, se realizó la instalación de los sensores y equipos necesarios para su funcionamiento en una única caja, mientras que para la estación de DLIA se realizó la instalación en dos compartimientos diferentes.

3.1.2 Error y desviación

- Estación Ráquira

Los monitoreos realizados en la estación de Ráquira se enfocan en determinar la capacidad de los sensores para realizar mediciones que luego serán promediadas a horas

y días. Los resultados obtenidos se pueden observar en la Ilustración 3-3. El promedio obtenido en el tiempo de monitoreo es de 11.27µg/m^3, con un total de datos horarios validos de 996 (incluyendo los tres sensores evaluados). La desviación de los sensores fue de 2.1 y un coeficiente de variación de 18.6 para la evaluación horaria.

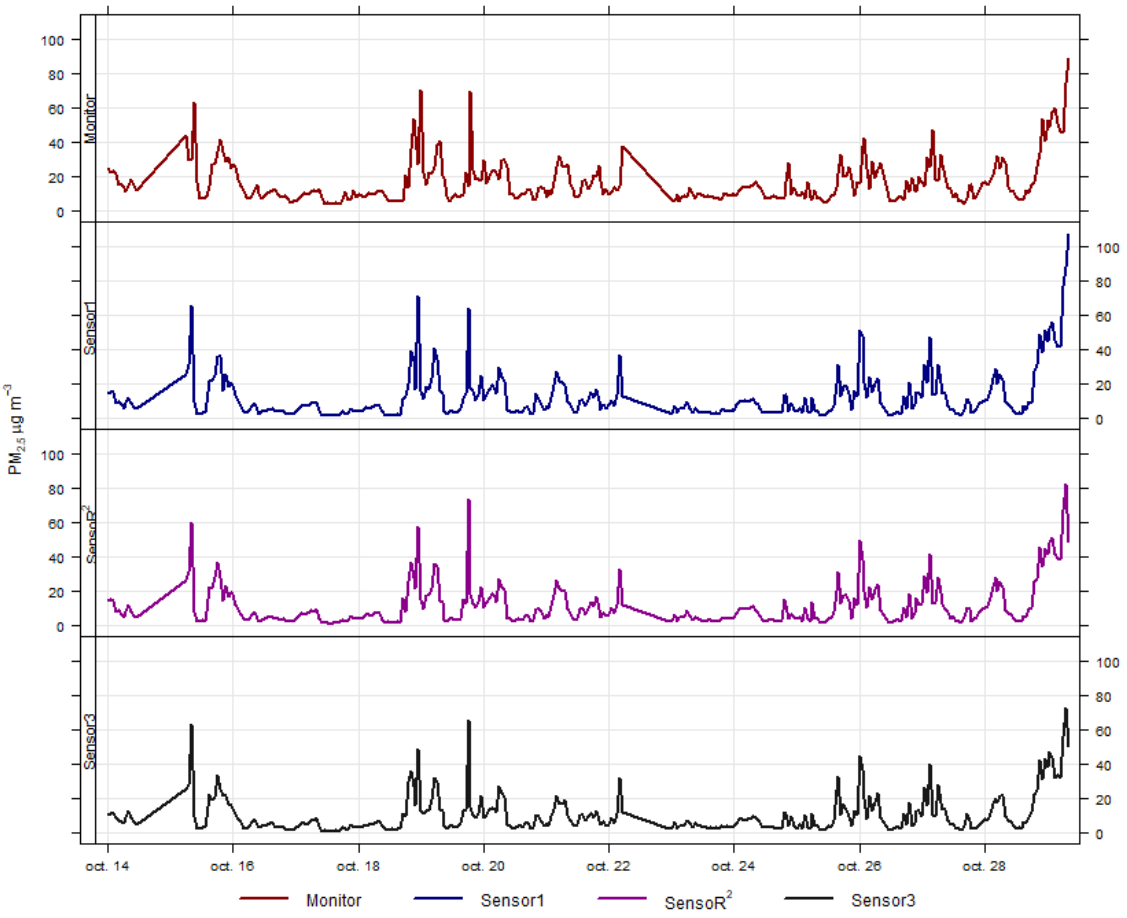


Ilustración 3-3 Sensores y monitor de referencia estación Ráquira, Monitoreo realizado entre el 14 de octubre 2021 y el 30 de octubre de 2021. $PM_{2.5}$.

En estos monitoreos se obtuvieron correlaciones horarias cercanas a 0.95. Lo cual muestra un comportamiento adecuado de los sensores. En la Tabla 3-1 se presentan los coeficientes obtenidos para cada uno de los sensores evaluados con una temporalidad horaria. La Ilustración 5-11, Ilustración 5-12 y Ilustración 5-13, presentan los gráficos de correlación con los promedios horarios para cada uno de los sensores estudiados.

Tabla 3-1 Parámetros de correlación para los sensores evaluados en la estación de Ráquira con temporalidad horaria

Sensor	Intercepto	Pendiente	Coeficiente de correlación R^2
1 - SPS30_4A3A	-5.04	1.053	0.93
2 - SPS30_473B	-3.92	0.938	0.96
3 - SPS30_4E2E	-3.39	0.849	0.95

Para la validación diaria el promedio obtenido en el tiempo de monitoreo es de 13.34 µg/m^3, con un total de datos diarios validos de 42 (incluyendo los tres sensores evaluados). La desviación de los sensores fue de 1.91 y un coeficiente de variación de 14.33 para la evaluación diaria. En esta temporalidad los sensores presentan valores de correlación mayores a los horarios, presentando valores cercanos a 1.

Tabla 3-2 Parámetros de correlación para los sensores evaluados en la estación de Ráquira con temporalidad diaria

Sensor	Intercepto	Pendiente	Coeficiente de correlación R^2
1 - SPS30_4A3A	-5.99	1.116	0.994
2 - SPS30_473B	-3.50	0.915	0.996
3 - SPS30_4E2E	-2.76	0.813	0.993

En la Tabla 3-2 se presentan los coeficientes obtenidos para cada uno de los sensores evaluados con una temporalidad diaria. La Ilustración 5-15, Ilustración 5-16 y la Ilustración 5-17, presentan los gráficos de correlación con los promedios diarios para cada uno de los sensores estudiados

De esta manera los errores de los monitoreos obtenidos, en las temporalidades diarias y horarias se pueden detallar en la Tabla 3-3.

Tabla 3-3 Error monitoreo validación estación de Ráquira.

	RMSE	NRMSE
Horario	5.89	36.26
Diario	5.45	29.70

- Estación DLIA

Los monitoreos realizados en la estación DLIA se enfocan en determinar la capacidad de los sensores con una temporalidad de minutos. Adicionalmente se realiza la evaluación de las mediciones en una escala de horas y días. Los resultados obtenidos se pueden observar en la Ilustración 3-4 El promedio obtenido en el tiempo de monitoreo es de 15.45µg/m^3, con un total de datos horarios validos de 280 (incluyendo los dos sensores evaluados). La desviación de los sensores fue de 0.41 y un coeficiente de variación de 2.63 para la evaluación horaria.

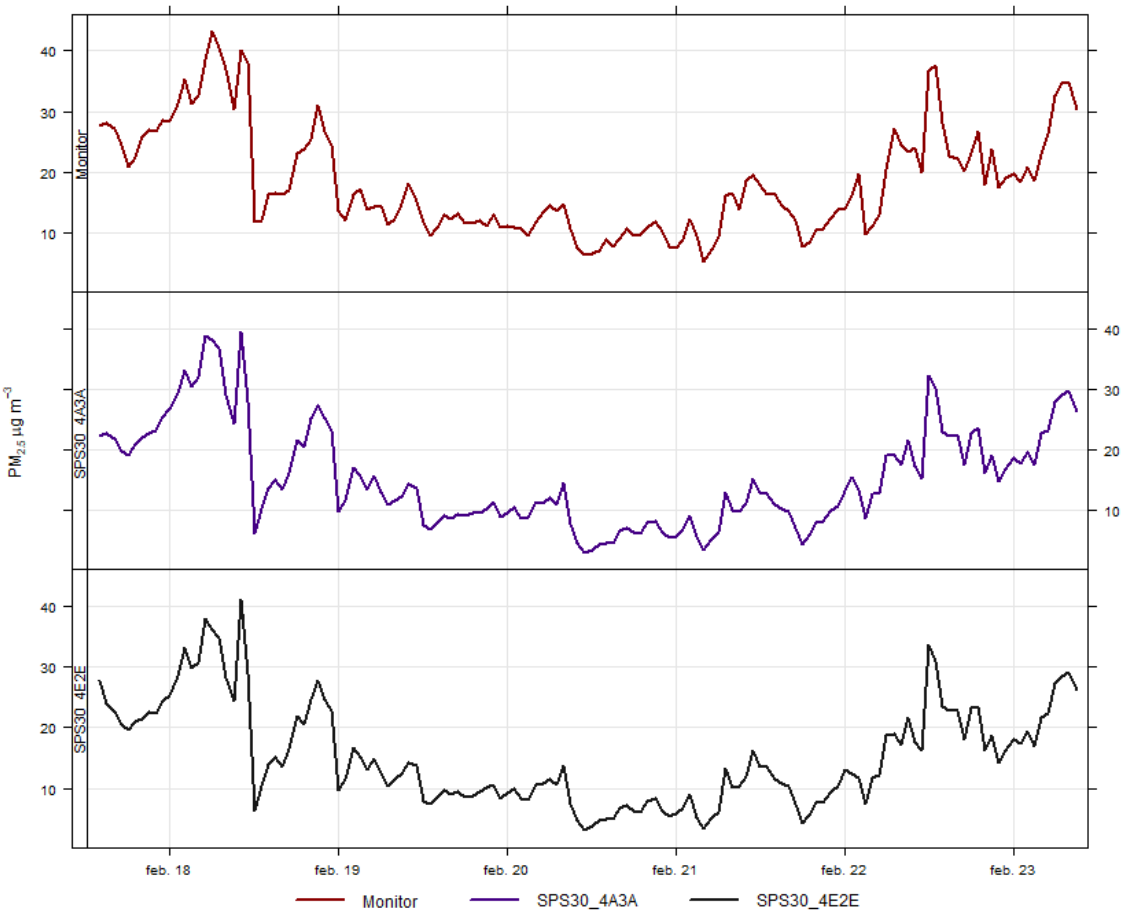


Ilustración 3-4 Sensores y monitor de referencia estación DLIA, Monitoreo realizado entre el 17 de febrero de 2022 y el 24 de febrero de 2022.

En estos monitoreos se obtuvieron correlaciones horarias superiores a 0.95. Lo cual muestra un comportamiento muy bueno para los sensores. En la Tabla 3-4 se presentan los coeficientes obtenidos para cada uno de los sensores evaluados con una temporalidad

horaria. La Ilustración 5-2, Ilustración 5-3, presentan los gráficos de correlación con los promedios horarios para cada uno de los sensores estudiados.

Tabla 3-4 Parámetros de correlación para los sensores evaluados en la estación de DLIA con temporalidad horaria

Sensor	Intercepto	Pendiente	Coeficiente de correlación R^2
1 - SPS30_4A3A	-1.516	0.930	0.949
2 - SPS30_4E2E	-1.687	0.932	0.954

Para la validación diaria el promedio obtenido en el tiempo de monitoreo es de 16.65 µg/m^3, con un total de datos diarios validos de 14 (incluyendo los dos sensores evaluados). La desviación de los sensores fue de 0.18 y un coeficiente de variación de 1.08 para la evaluación diaria. En esta temporalidad los sensores presentan valores de correlación mayores a los horarios, presentando valores superiores a 0.99.

Tabla 3-5 Parámetros de correlación para los sensores evaluados en la estación de DLIA con temporalidad diaria

Sensor	Intercepto	Pendiente	Coeficiente de correlación R^2
1 - SPS30_4A3A	-2.32	0.971	0.993
2 - SPS30_4E2E	-2.4	0.970	0.996

En la Tabla 3-5 se presentan los coeficientes obtenidos para cada uno de los sensores evaluados con una temporalidad diaria. La Ilustración 5-5, Ilustración 5-6, presentan los gráficos de correlación con los promedios diarios para cada uno de los sensores estudiados.

La evaluación minutal (máxima temporalidad reportada por los equipos de la estación DLIA) se realiza siguiendo los mismos criterios empelados anteriormente, es así que se obtiene un promedio de monitoreo de 15.33 µg/m^3, con un total e datos validos de 16596 (incluyendo los dos sensores evaluados). La desviación de los sensores fue de 0.58 y un coeficiente de variación de 3.8 para la evaluación minutal. En esta temporalidad los

sensores presentan valores de correlación superiores a 0.85, lo cual indica una buena correlación y esto permite su uso.

Tabla 3-6 Parámetros de correlación para los sensores evaluados en la estación de DLIA con temporalidad minutal

Sensor	Intercepto	Pendiente	Coeficiente de correlación R^2
1 - SPS30_4A3A	-0.813	0.901	0.865
2 - SPS30_4E2E	-1.042	0.895	0.871

En la Tabla 3-6 se presentan los coeficientes obtenidos para cada uno de los sensores evaluados con una temporalidad diaria. La Ilustración 3-5 e Ilustración 3-6, presentan los gráficos de correlación con los promedios minutales diarios para cada uno de los sensores estudiados.

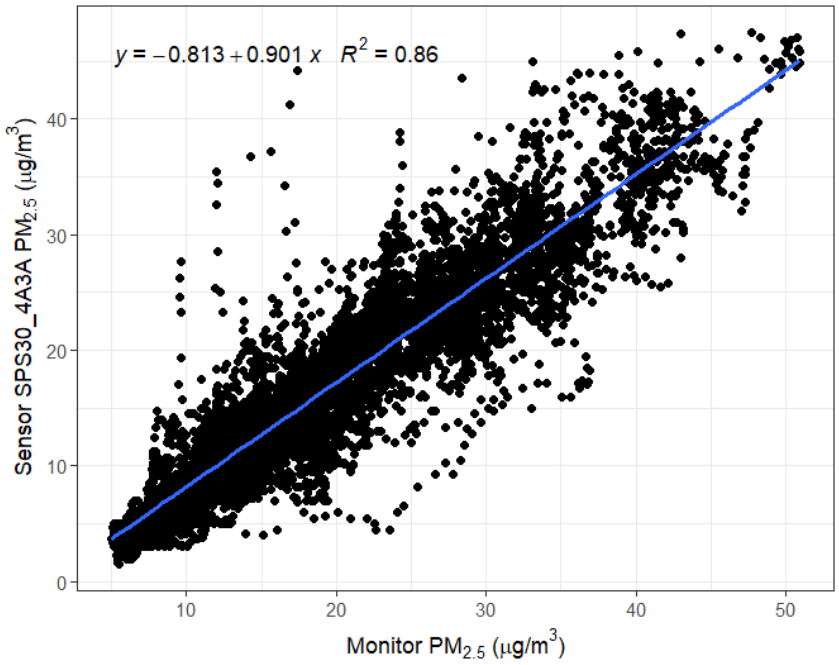


Ilustración 3-5 Correlación minutal sensor 1 SPS_30 4A3A con monitor de referencia, Estación DLIA

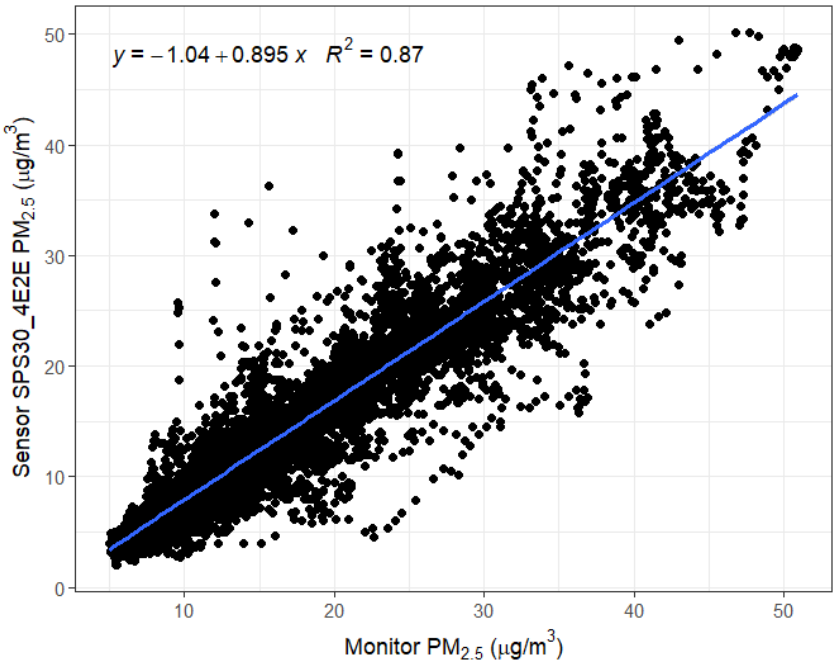


Ilustración 3-6 Correlación minutal sensor 1 SPS_30 4E2E con monitor de referencia, Estación DLIA

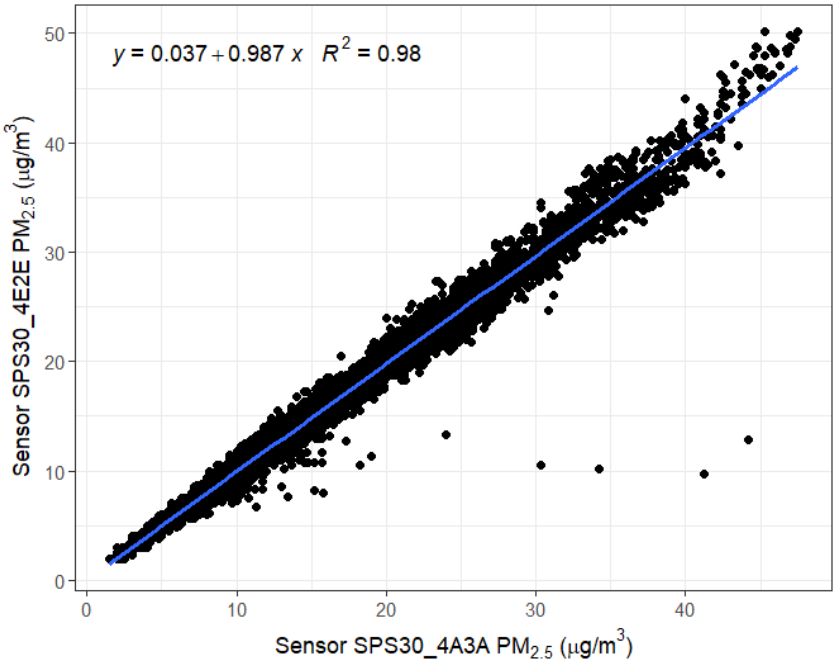


Ilustración 3-7 Correlación minutal sensores SPS_30 4A3A y SPS_30 4E2E

De esta manera los errores de los monitoreos obtenidos, en las temporalidades minutales, diarias y horarias se pueden detallar en la Tabla 3-7.

Tabla 3-7 Error monitoreo validación estación de DLIA.

	RMSE	NRMSE
Minutal	4.379	24.065
Horario	3.459	18.88
Diario	2.974	15.191

La correlación de datos minútales con los datos de humedad reportados por los sensores permite determinar si existe alguna tendencia d los sensores a reportar el mismo dato bajo ciertas condiciones de humedad. Esto permite descartar o corroborar si se requiere hacer algún ajuste a los mismos sensores para tener en cuenta estas variables. En estos se puede observar cómo no existe una tendencia de los sensores a reportar los mismos valores de concentración a las mismas condiciones de humedad.

- Evaluación de criterios para la validación de sensores Criterios

Para la determinación de si los sensores son aptos o no para el monitoreo, se utilizan los criterios descritos en la Tabla 2-1, Estos criterios son los sugeridos por la EPA para su validación [49].

Tabla 3-8 Criterios de aceptación de los sensores según monitoreo realizado en la estación Ráquira

Temporalidad	**Métrica**	**Criterio**	**Valor deseable**	**Valor obtenido**	**Conclusión**
Diaria	Precisión	Desviación estándar (SD)	≤5 µg/m^3	1.91	Cumple
	Error de sesgo bias	Pendiente	1.0±0.35	1.116 0.915 0.813	Cumple
		Intercepto (µg/m^3)	-5 ≤b≤5 µg/m^3	-5.99 -3.50 -2.76	No cumple 4A3A
	Linealidad	R^2	≥0.70	0.994 0.996 0.993	Cumple

Temporalidad	Métrica	Criterio	Valor deseable	Valor obtenido	Conclusión
	Error	RMSE	RMSE≤7	5.457	Cumple
Horaria	Precisión	Desviación estándar (SD)	≤5 µg/m^3	2.1	Cumple
	Error de sesgo bias	Pendiente	1.0±0.35	1.053 0.938 0.849	Cumple
		Intercepto (µg/m^3)	-5 ≤b≤5 µg/m^3	-5.04 -3.92 -3.39	No cumple 4A3A
	Linealidad	R^2	≥0.70	0.93 0.96 0.95	Cumple
	Error	RMSE	RMSE≤7	5.89	Cumple

Tabla 3-9 Criterios de aceptación de los sensores según monitoreo realizado en la estación DLIA

Temporalidad	Métrica	Criterio	Valor deseable	Valor obtenido	Conclusión
Diaria	Precisión	Desviación estándar (SD)	≤5 µg/m^3	0.18	Cumple
	Error de sesgo bias	Pendiente	1.0±0.35	0.972 00970	Cumple
		Intercepto (µg/m^3)	-5 ≤b≤5 µg/m3	-2.32 -2.40	Cumple
	Linealidad	R^2	≥0.70	0.993 0.996	Cumple
	Error	RMSE	RMSE≤7	2.974	Cumple
Horaria	Precisión	Desviación estándar (SD)	≤5 µg/m^3	0.41	Cumple
	Error de sesgo bias	Pendiente	1.0±0.35	0.930 0.932	Cumple

Temporalidad	Métrica	Criterio	Valor deseable	Valor obtenido	Conclusión
		Intercepto (µg/m^3)	-5 ≤b≤5 µg/m^3	-1.516 -1.687	Cumple
	Linealidad	R^2	≥0.70	0.950 0.954	Cumple
	Error	RMSE	RMSE≤7	3.459	Cumple
Minutal	Precisión	Desviación estándar (SD)	≤5 µg/m^3	0.58	Cumple
	Error de sesgo bias	Pendiente	1.0±0.35	0.901 0.895	Cumple
		Intercepto (µg/m^3)	-5 ≤b≤5 µg/m^3	-0.813 -1.04	Cumple
	Linealidad	R^2	≥0.70	0.865 0.871	Cumple
	Error	RMSE	RMSE≤7	4.37	Cumple

Los monitoreos realizados permiten identificar que los sensores son aptos y cumplen con todos los criterios para la validación. El sensor 4A3A, no cumplió los criterios en el monitoreo de la estación de Ráquira. Esto es atribuible a la forma en que este fue instalado en la estación de Ráquira. Ya que en esta el sensor se encontraba instalado junto a una fuente de calor dentro de la caja de monitoreo. Esta fuente de calor son los equipos usados para la transmisión de información en tiempo real. Para el monitoreo en la estación de la DLIA, esto fue modificado, dejando los sensores en una caja aparte de los equipos de transmisión.

3.1.3 Efecto de variables atmosféricas

La correlación con las variables atmosféricas se lleva a cabo con los promedios horarios de la información capturada por la estación de la DLIA. La Ilustración 3-8 resume los coeficientes de correlación de Pearson (por 100) para las variables estudiadas. Se encuentra que para las variables de temperatura y humedad existe una alta correlación inversa para el municipio de Mosquera; mientras que para los sensores con las variables meteorológicas no se encuentra correlación alguna.

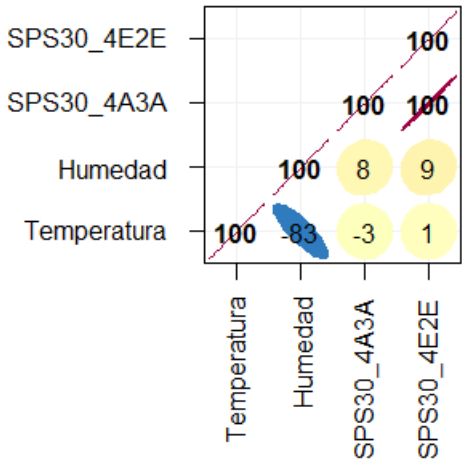


Ilustración 3-8 Matriz de coeficientes de correlación de Pearson (por 100), monitoreos estación DLIA

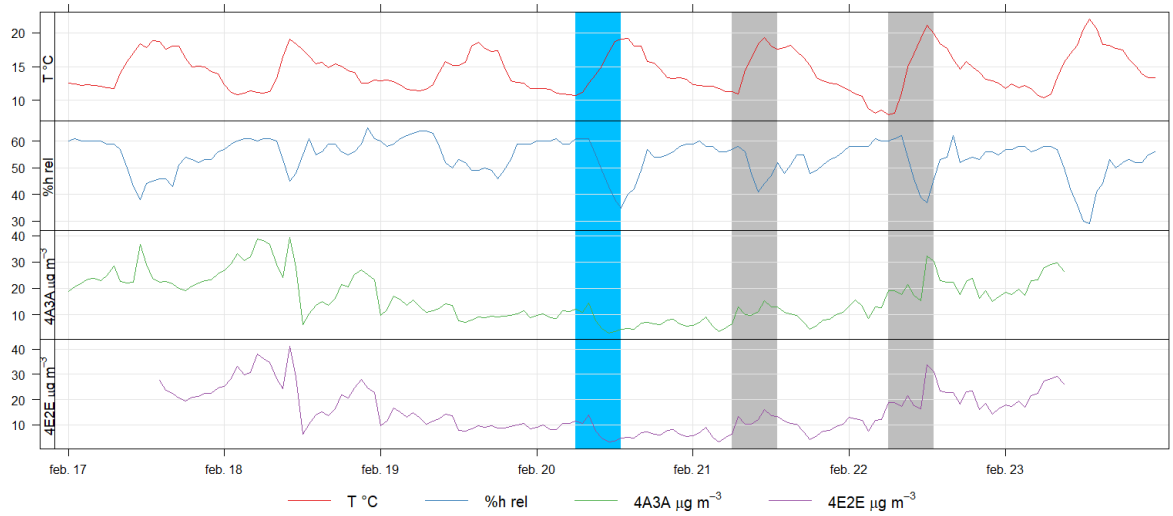


Ilustración 3-9 Sensores SPS30 y variables atmosféricas en la estación DLIA, Monitoreo realizado entre el 17 de febrero de 2022 y el 23 de febrero de 2022.

Para el periodo analizado se encuentran correlaciones a ciertas horas del día. Estas correlaciones se deben a la propia naturaleza del monitoreo y las horas en las que se presentan. Las áreas sombreadas de color celeste y gris en la Ilustración 3-9 presentan periodos relaciones inversas y directas respectivamente con a la temperatura. Esto es atribuible a los fenómenos propios de la zona, como las emisiones vespertinas en días hábiles (21 y 22 de febrero de 2022).

Esta ausencia de correlación entre las mediciones de material particulado con los sensores y la temperatura y humedad es la deseada. La Ilustración 3-10 y el coeficiente de determinación demuestran que no existe sesgo por temperatura en la medición de material particulado $PM_{2.5}$.

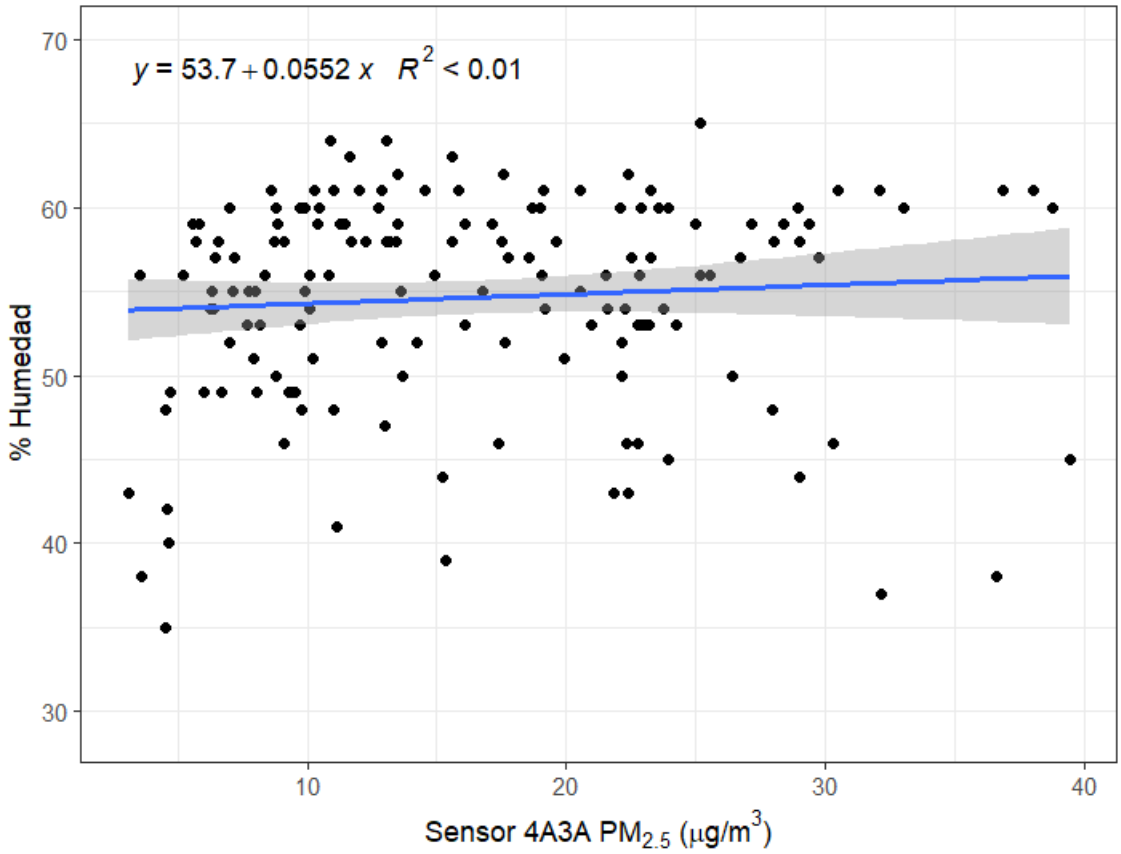


Ilustración 3-10 Correlación horaria sensor SPS30 4A3A con sensor de temperatura

3.2 Monitoreo *UAV* o *drone*

El monitoreo con *drone* es llevado a cabo en la ciudad de Bogotá y en el municipio de Mosquera.

3.2.1 Monitoreo en la ciudad de Bogotá

El monitoreo es realizado en frente al Parque Nacional de la Cuidad de Bogotá. Esta zona se caracteriza por ser un sector muy concurrido, en el cual las emisiones vehiculares son las que prevalecen. Adicionalmente cerca de esta zona se encuentra una cadena

montañosa que caracteriza la ciudad de Bogotá. Los vuelos en este sector iniciaron a las 510 de la mañana el día 2 de febrero de 2022.Estos vuelos fueron realizados cada 20 minutos.

Durante el monitoreo realizado se encuentra que no solo existen las emisiones vehiculares; adicional a esto, se encuentran emisiones de quemas generadas por la población ubicada en el Parque Nacional. Estas afectan directamente las mediciones realizadas con el equipo; presentando picos de hasta 200 µg/m^3 de $PM_{2.5}$ a nivel del suelo.

- Vuelos ascendentes vs descendentes

En la Ilustración 3-11 e Ilustración 3-12 se puede observar cómo los perfiles realizados en el ascenso y descenso varían. Esto es esperable pues la atmosfera no es estática y presenta variaciones en todo momento. Sin embargo, si es esperable que la atmosfera presente una evolución congruente o uniforme entre dos monitoreos consecutivos. Esto no se presenta en los vuelos de la 5:10 y 5:30 del día 2 de febrero.

El perfil descendente en ambos escenarios presenta menores variaciones absolutas en la concentración medida. Es así como para la medición ascendente de las 5:10, el cambio de concentración es de 33 µg/m^3; mientras que el cambio en el descenso es de 20 µg/m^3. En el vuelo posterior se presentan iguales comportamientos en el ascenso (cambio de 22 µg/m^3) mientras que no se presenta cambio en el descenso.

Tabla 3-10 Diferencia de concentraciones en ascenso y descenso en los vuelos

Hora vuelo	**Δ concentración en ascenso µg/m^3**	**Δh ascenso m**	**Δ concentración en descenso µg/m^3**	**Δh descenso m**
5:10am	33	75	20	15
5:30am	22	100	0	-
5:50am	28	100	2	100
6:30am	37	100	0	100

Al ser vuelos consecutivos se esperan concentraciones y comportamientos similares en los vuelos. Sin embargo, se observa que este no es el caso para los vuelos de las 5:10am a las 6:30 del 2 de febrero de 2022 al comparar los vuelos en ascenso y descenso (ver Ilustración 3-11, Ilustración 3-12, Ilustración 3-13 e Ilustración 3-14)

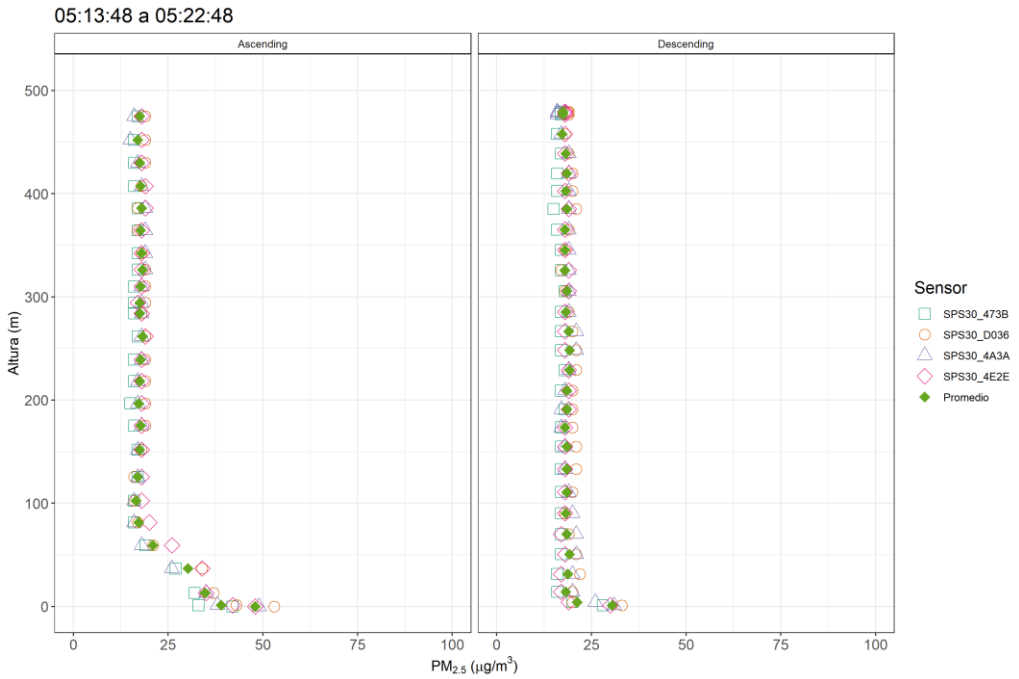


Ilustración 3-11 Perfil vertical de $PM_{2.5}$ en la ciudad de Bogotá 5:10 am 2022-02-02

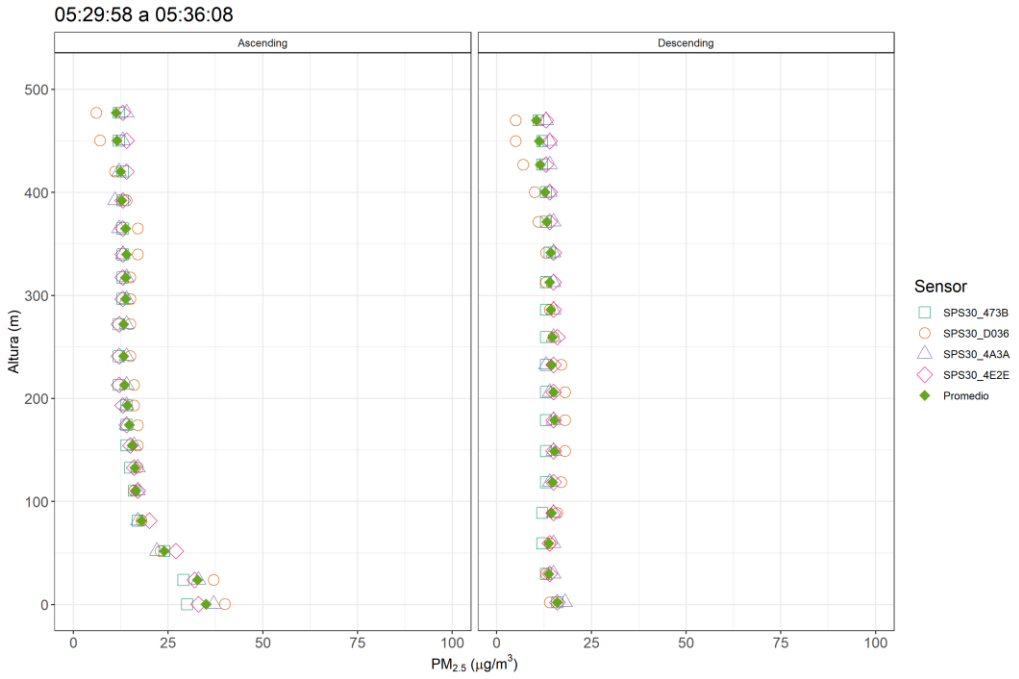


Ilustración 3-12 Perfil vertical de PM2.5 en la ciudad de Bogotá 5:30 am 2022-02-02

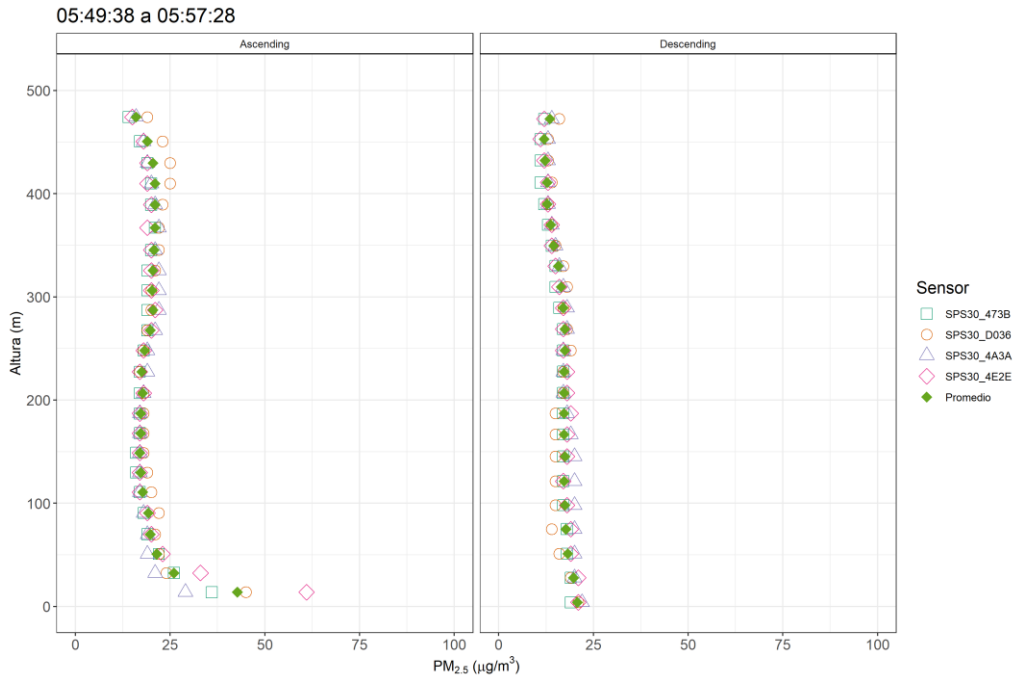


Ilustración 3-13 Perfil vertical de PM2.5 en la ciudad de Bogotá 5:50 am 2022-02-02

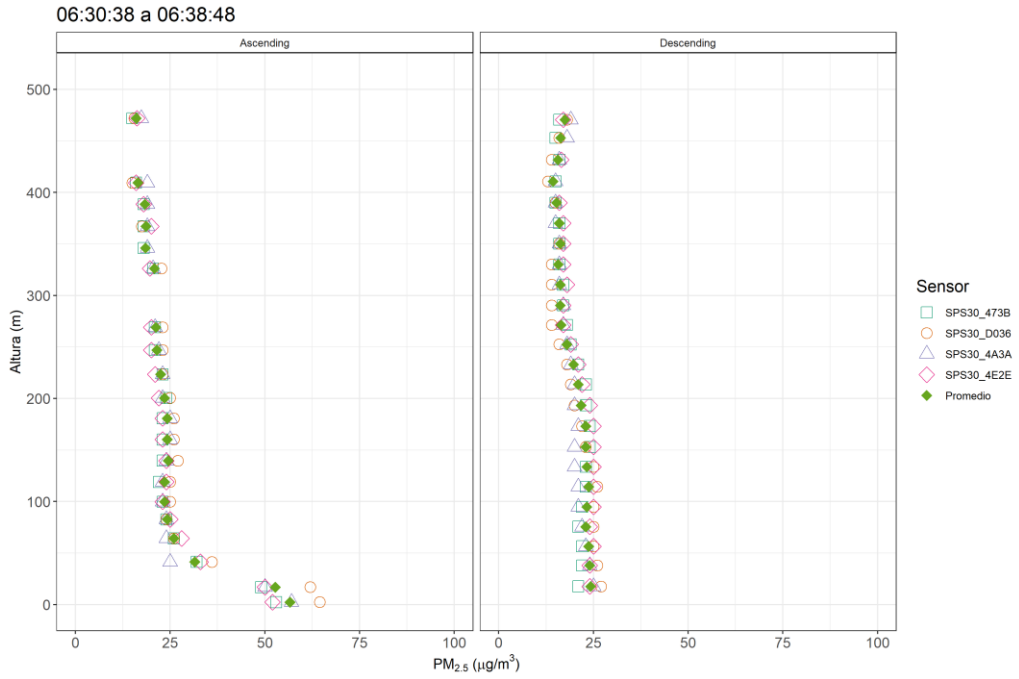


Ilustración 3-14 Perfil vertical de PM2.5 en la ciudad de Bogotá 6:30 am 2022-02-02

Esta diferencia entre el ascenso y el descenso es atribuible al régimen turbulento y de dispersión que se genera por el propio equipo UAV. De esta manera, se establece que los

monitoreos que se realizan en modo de ascenso capturan mejor los cambios en las concentraciones de material particulado.

Esta diferencia en la dirección del vuelo afecta directamente la identificación de las transiciones atmosféricas que se estudian. Esto debido a que son justamente los criterios que se utilizan para ajustar las capas. En Ilustración 3-15 y la Ilustración 3-16 podemos observar como la primera capa de la atmosfera (capa que para este caso presenta un descenso en las concentraciones a medida que se incrementa la altitud), difiere en hasta 90 metros de altura, pasando de un espesor de 160 metros a 70 metros.

De manera similar sucede con el vuelo de las 5:50 am (Ilustración 3-17 e Ilustración 3-18). En la parte próxima al suelo, se determinan espesores de capas de 230 metros y 100 metros. En la parte superior (450m a 470m), la parte próxima a la altura máxima se observa como en el vuelo de descenso, las concentraciones disminuyen a medida que se desciende. Esto no sucede en el vuelo de ascenso (concentraciones que aumentan a medida que asciende el sensor).

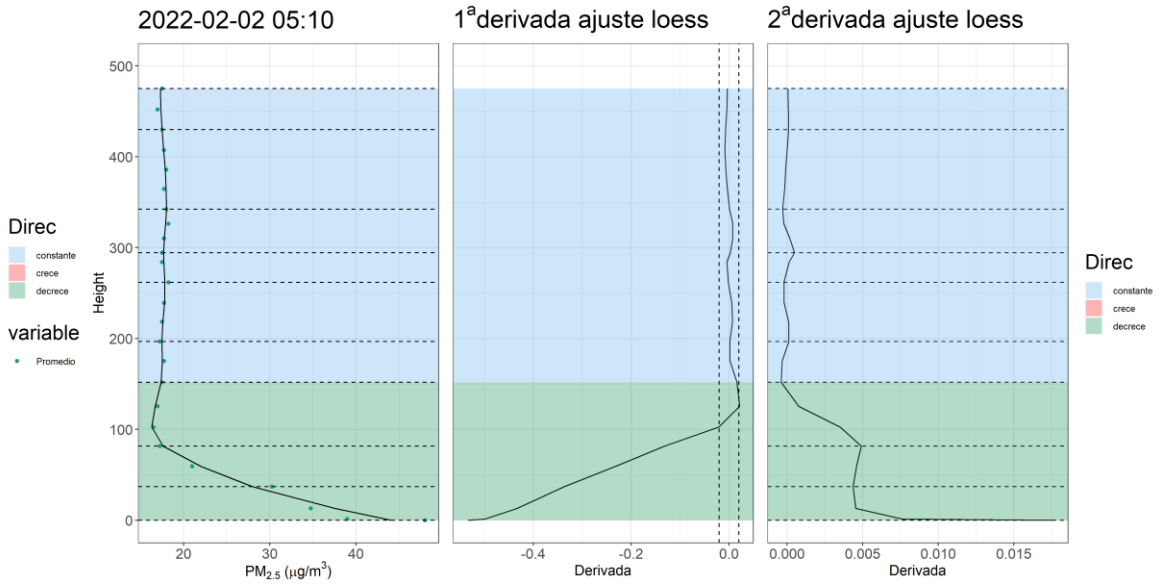


Ilustración 3-15 Cortes en la atmosfera en Bogotá 5:10 am 2022-02-02 con vuelo en ascenso

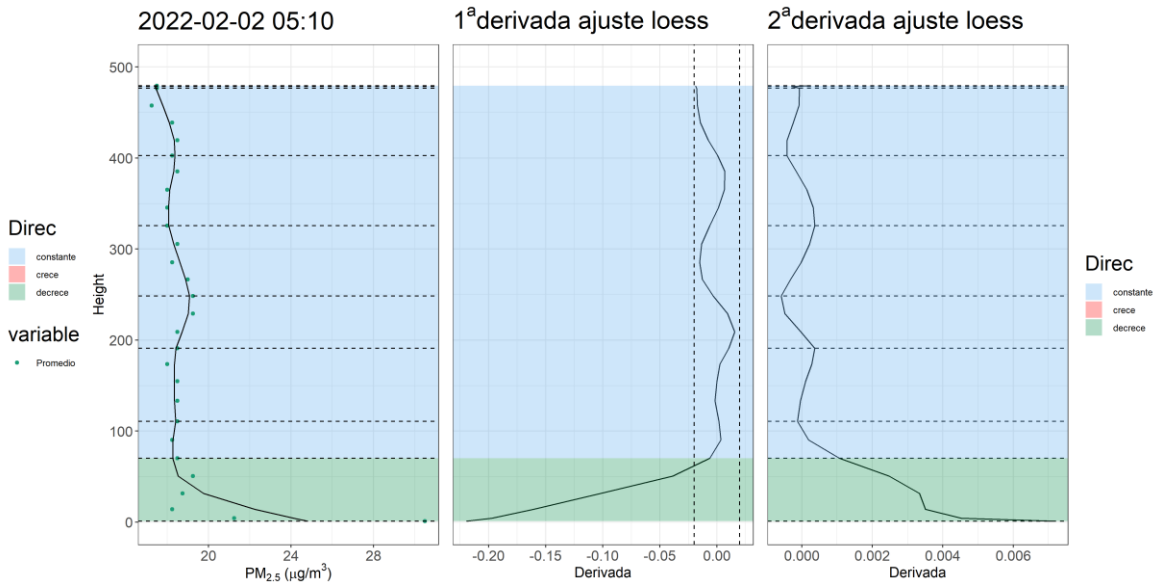


Ilustración 3-16 Cortes en la atmosfera en Bogotá 5:10 am 2022-02-02 con vuelo en descenso

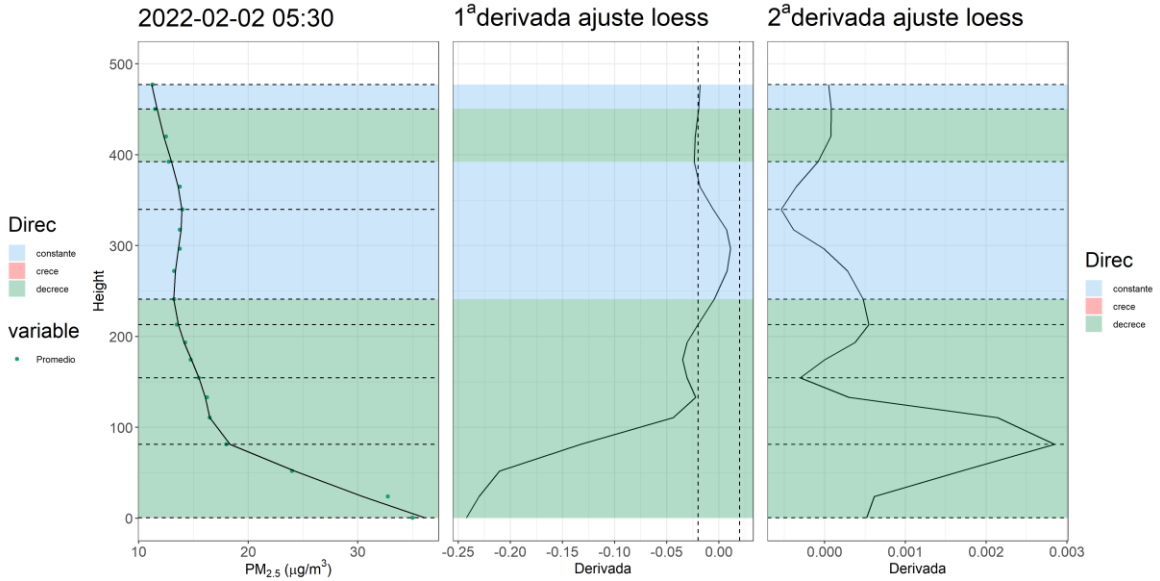


Ilustración 3-17 Cortes en la atmosfera en Bogotá 5:30 am 2022-02-02 con vuelo en ascenso

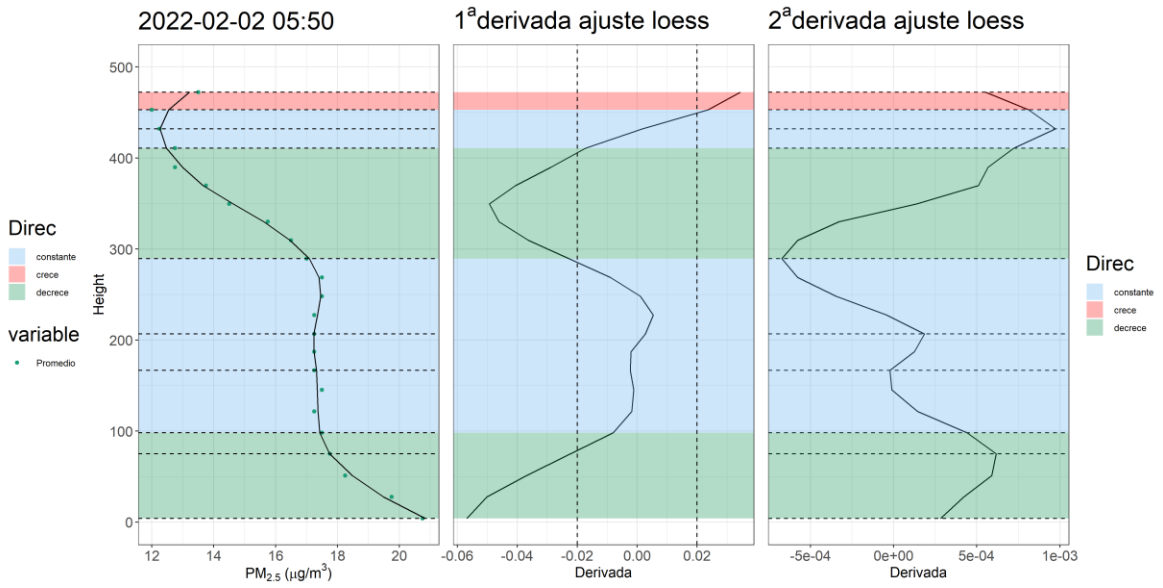


Ilustración 3-18 Cortes en la atmosfera en Bogotá 5:30 am 2022-02-02 con vuelo en descenso

Todas estas diferencias en los vuelos de ascenso y descenso se explican desde el estudio aerodinámico del equipo *drone* [57], [58]. Este equipo desarrolla un régimen turbulento muy fuerte en la parte inferior del mismo, zona donde confluye el aire desarrollado por las hélices. Esto causa que el equipo recorra zonas atmosféricas que ya han sido alteradas por este perfil desarrollado. Es por este motivo que solo se contempla el estudio de los perfiles de material particulado obtenidos con *drones* en las mediciones en las que el equipo se encuentra en un modo de ascenso.

- Evolución atmosférica en el transcurso del día

Las mediciones realizadas cada 20 minutos en el día de monitoreo se pueden observar en la Ilustración 3-20 En esta vemos la evolución de la atmosfera a lo largo del día.

En el día de monitoreo se presentaron fuertes emisiones a las 6:40am y a las 7:25am. Estas emisiones provenientes de la quema de material vegetal distorsionan la medición en los primeros 20 metros de monitoreo. Sin embargo, se observa como la dispersión es fuerte en esta zona de estudio, ya que las concentraciones anteriores a la quema se recuperan en aproximadamente 20 minutos.

Las concentraciones que se miden en antes de las 7:10 am, ya muestran como la atmosfera cuenta con al menos dos zonas muy definidas. Una primera zona en la cual el

material particulado es cambiante y disminuye a medida que aumenta la altura. Una segunda zona donde las concentraciones de material particulado son constantes y no presentan cambios grandes. La división entre estas dos regiones se presenta entre los 100 y 250 metros (Ver Ilustración 3-20). Los monitoreos realizados, nos permiten identificar que, para el día de estudio, se presentó otra división en la atmosfera por encima de los 300 metros, en esta zona las concentraciones disminuyen. No obstante, no es posible establecer la altura en la que este fenómeno finaliza, debido a la altura del monitoreo.

Las condiciones de estabilidad se registran a las 7:50 de la mañana. A pesar de esto, no es posible determinar esta hora con precisión para este punto. Esto es causado por las fuertes emisiones evidenciadas durante el día.

Es importante recordar que la zona de monitoreo esta junto a una montaña, y que adicionalmente, muy cerca del sitio existen zonas propicias para la formación “Street canyons”, los cuales afectan las mediciones.

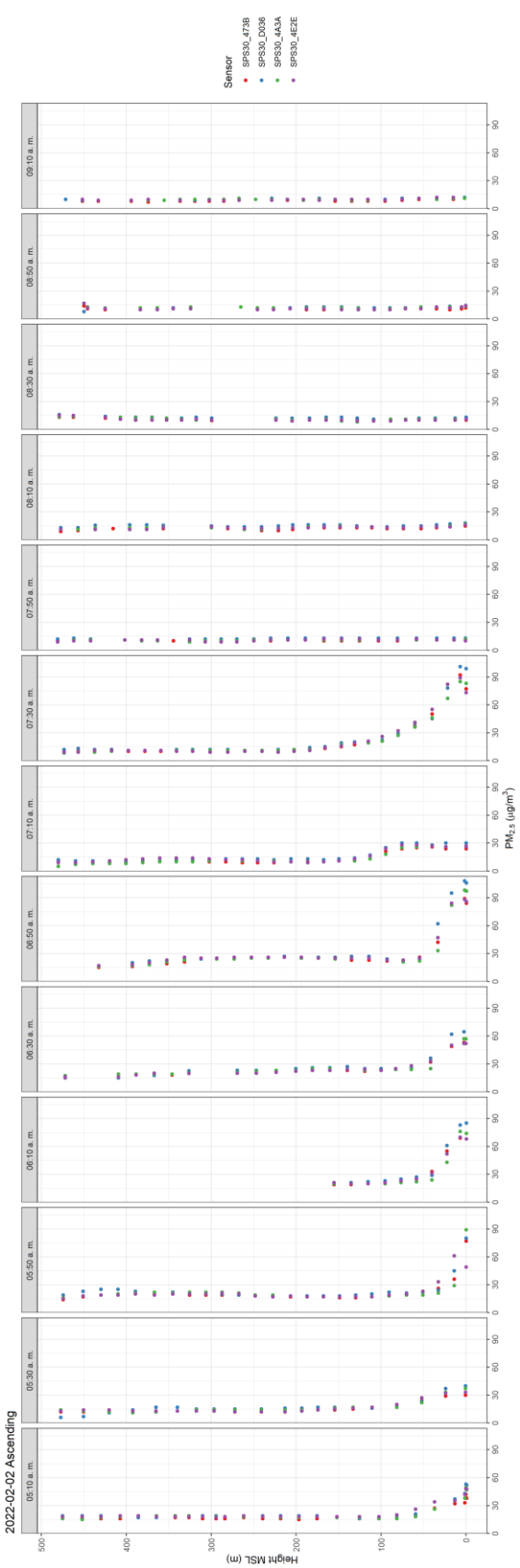


Ilustración 3-19 Mediciones de material particulado en la ciudad de Bogotá 2- febrero de 2022, 5:10 am a 9:10am

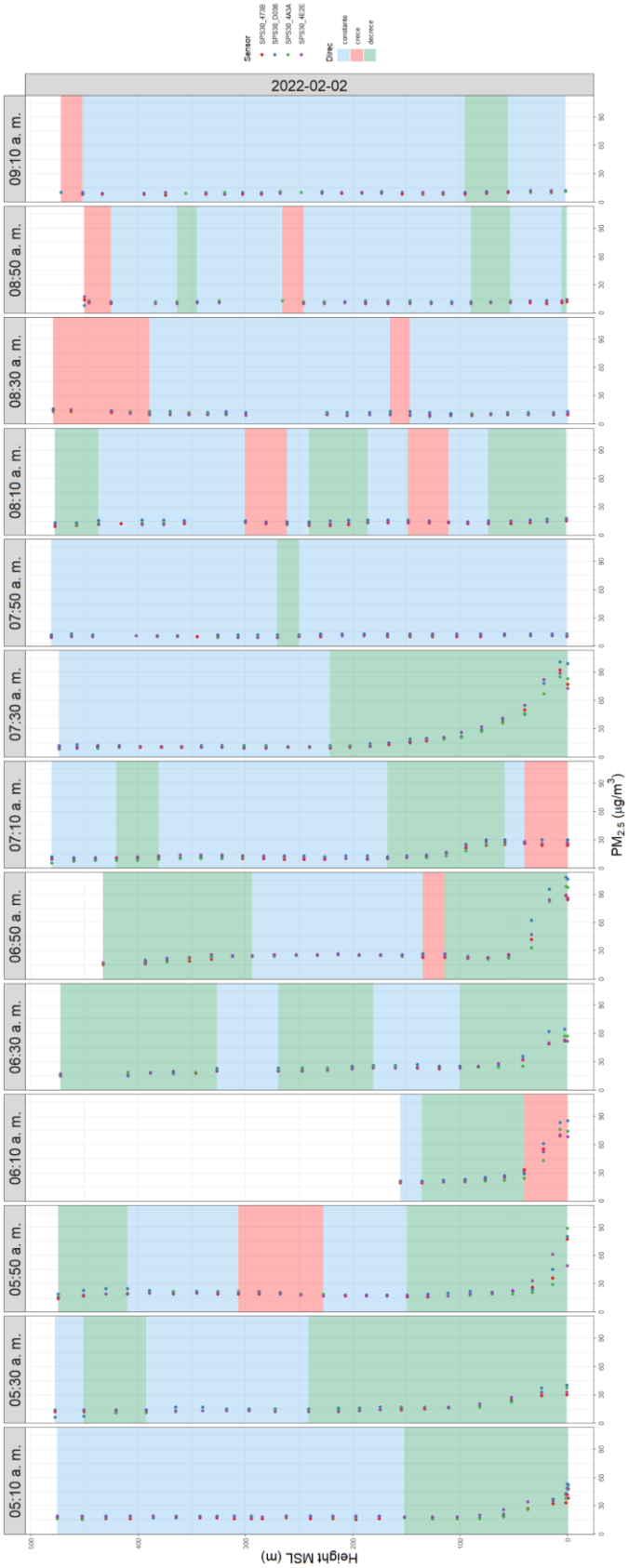


Ilustración 3-20 Capas atmosféricas propuestas para la ciudad de Bogotá basado en particulado en la ciudad de Bogotá 2- febrero de 2022, 5:10 am a 9:10am

3.2.2 Monitoreo en Mosquera

El monitoreo en el municipio de Mosquera tiene como objetivo determinar en días consecutivos el desarrollo de los perfiles verticales. Los vuelos en este municipio se realizaron desde las 5:30am hasta que se encuentra que el perfil se encuentra totalmente desarrollado. En este monitoreo se realizaron un total de 92 vuelos los cuales se presentan en la Ilustración 3-22.

En esta zona de estudio no se encuentran fuentes cercanas. Lo cual permite establecer que las concentraciones son unas concentraciones de fondo, y que son producto del mezclado y no de fuentes específicas. Sin embargo, aún existe la posibilidad de capturar “burbujas” de contaminantes que se mueven en la atmosfera tal como se observa en el monitoreo del 1 de marzo a las 9:30 am en la Ilustración 3-21. Estos valores presentados de 100 a 150 metros no son típicos en la zona de estudio, por lo que se puede concluir que este evento es causado a una masa con una concentración superior de material particulado.

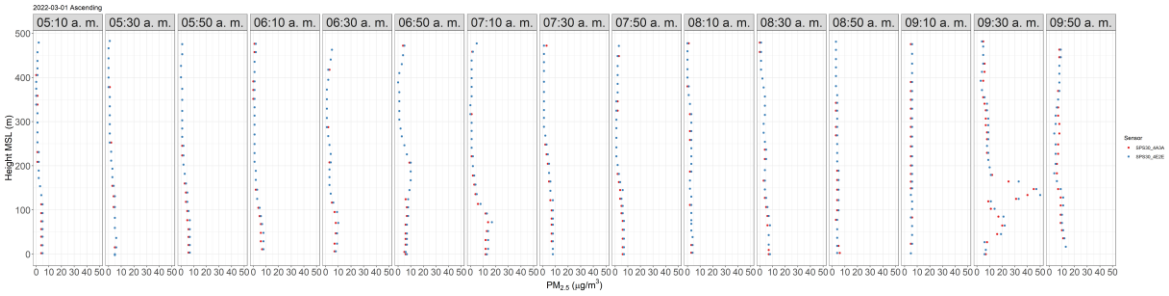


Ilustración 3-21 Mediciones de material particulado en Mosquera 1 de marzo 2022, 5:10 am a 9:50am

En los monitoreos realizados se ha identificado que en los días 28 de febrero a 2 de marzo se presentan comportamientos comprables. En estos días, la atmosfera presenta una zona en los primeros metros en la cual la concentración de material particulado tiene un valor de 7 y 10 µg/m^3. Encima de esta primera capa, existe una zona donde el material particulado desciende; y posterior a esto, las concentraciones se vuelven a homogeneizar a medida que se aumenta de altura en la atmosfera.

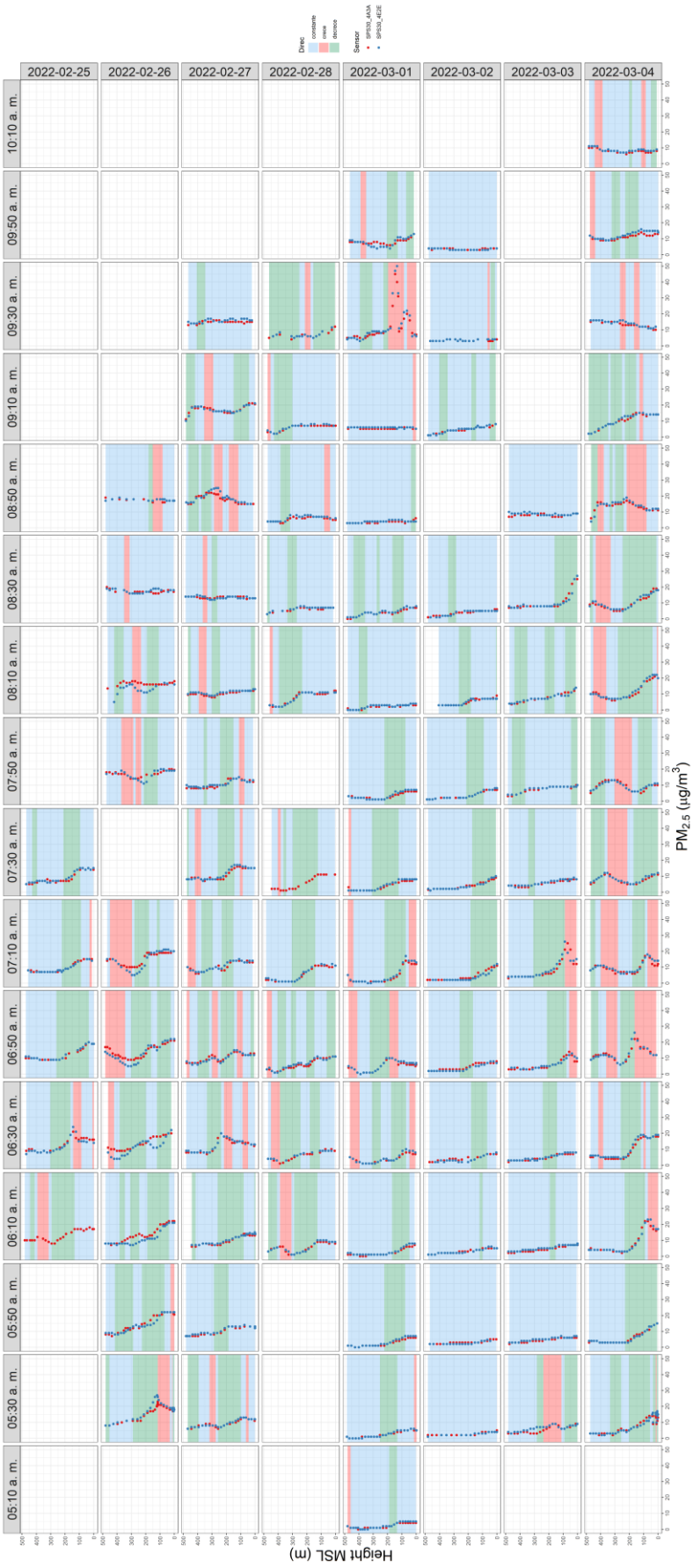


Ilustración 3-22 Capas atmosféricas propuestas para la ciudad de Bogotá basado en material particulado en el municipio de Mosquera 25 de febrero de 2022 a 4 de marzo de 2022

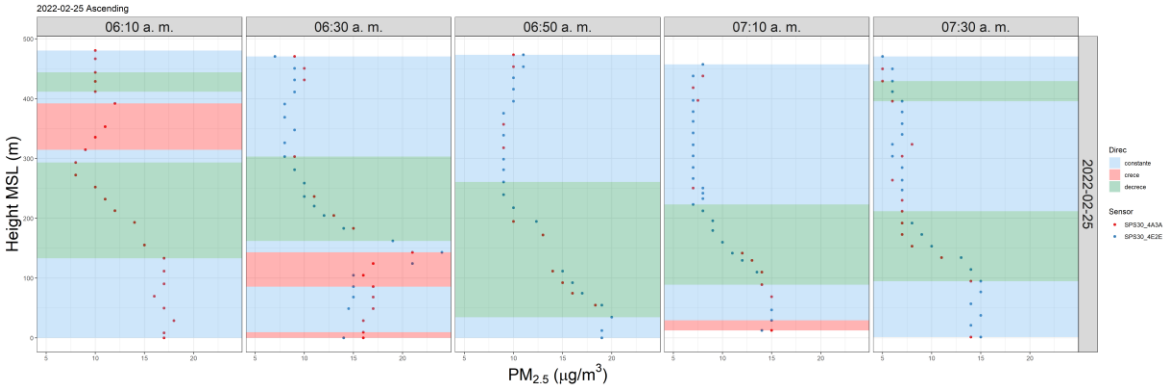


Ilustración 3-23 Capas atmosféricas propuestas para el municipio de Mosquera basado en la medición de material particulado 25 de febrero de 2022, 6:10 am a 7:30am

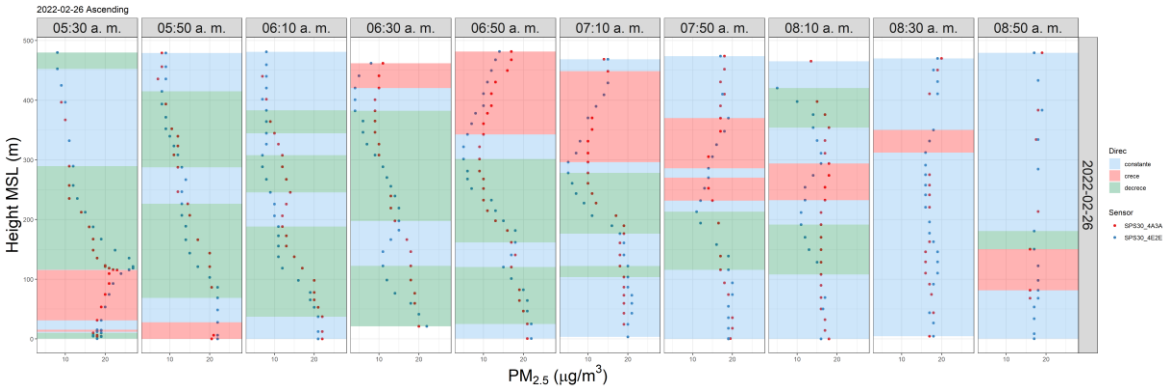


Ilustración 3-24 Capas atmosféricas propuestas para el municipio de Mosquera basado en la medición de material particulado 26 de febrero de 2022, 5:30 am a 8:50am

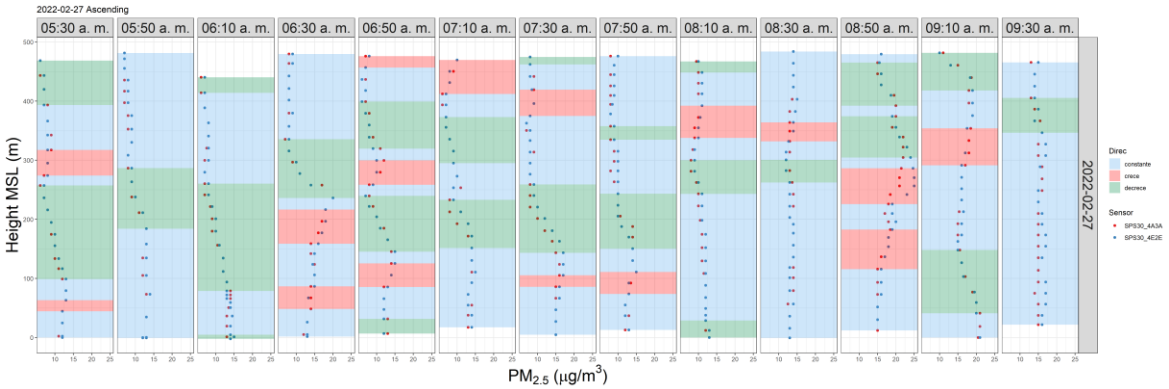


Ilustración 3-25 Capas atmosféricas propuestas para el municipio de Mosquera basado en la medición de material particulado 27 de febrero de 2022, 5:30 am a 9:30am

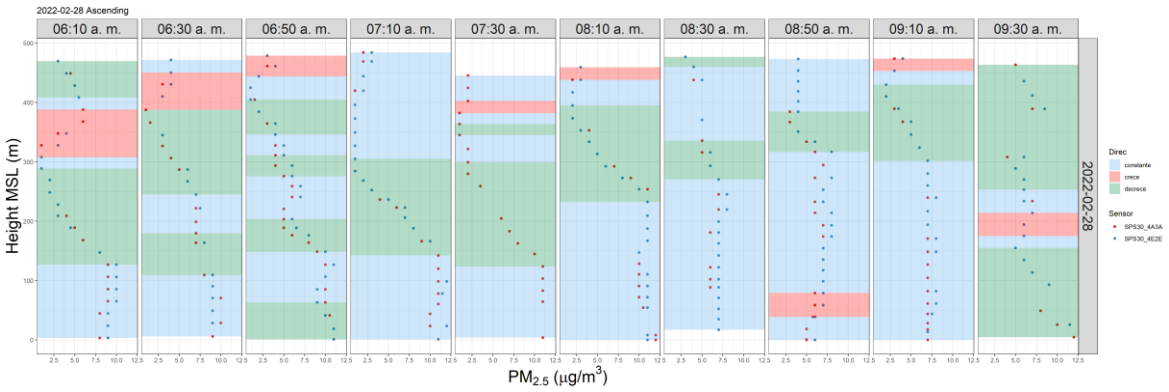


Ilustración 3-26 Capas atmosféricas propuestas para el municipio de Mosquera basado en la medición de material particulado 28 de febrero de 2022, 6:10 am a 9:30am

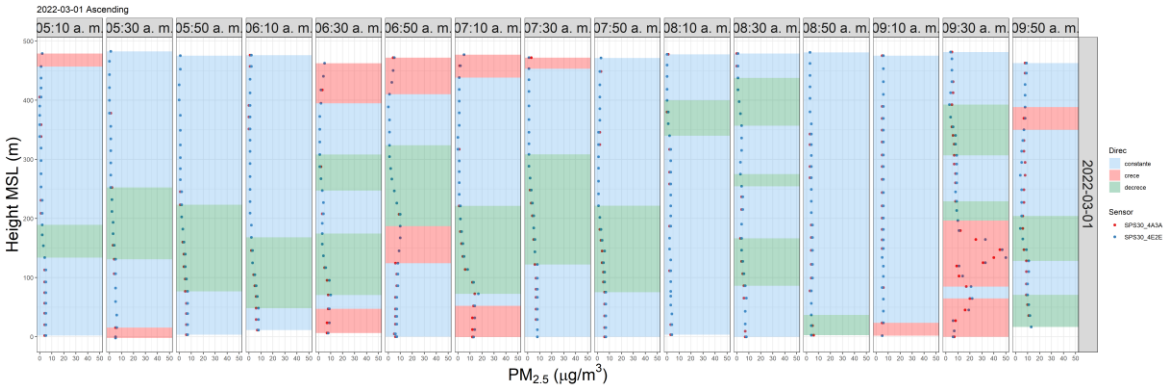


Ilustración 3-27 Capas atmosféricas propuestas para el municipio de Mosquera basado en la medición de material particulado 1 de marzo de 2022, 5:10 am a 9:50am

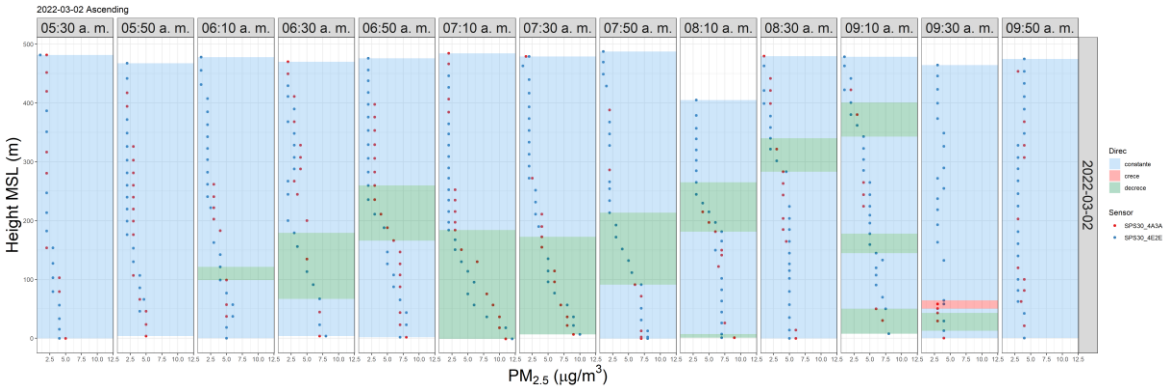


Ilustración 3-28 Capas atmosféricas propuestas para el municipio de Mosquera basado en la medición de material particulado 2 de marzo de 2022, 5:30 am a 9:50am

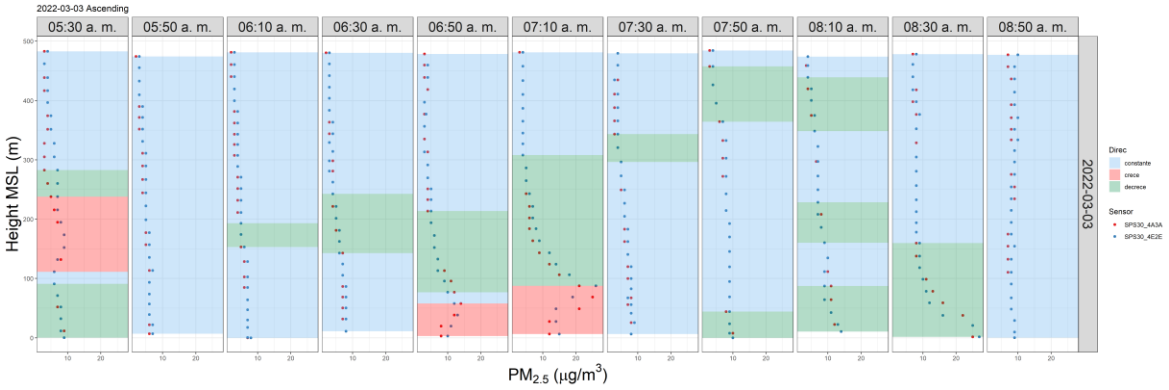


Ilustración 3-29 Capas atmosféricas propuestas para el municipio de Mosquera basado en la medición de material particulado 3 de marzo de 2022, 5:30 am a 8:50am

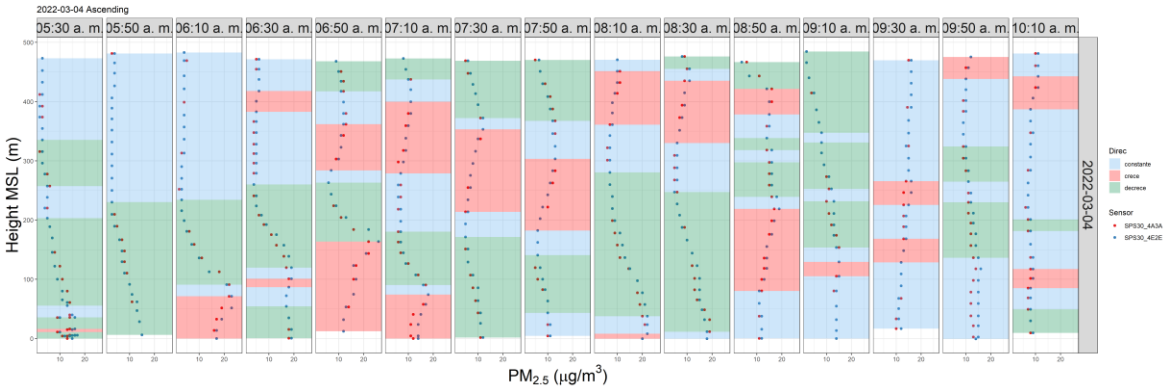


Ilustración 3-30 Capas atmosféricas propuestas para el municipio de Mosquera basado en la medición de material particulado 3 de marzo de 2022, 5:30 am a 10:10am

En la parte superior de los vuelos realizados se encuentran varios comportamientos de aumento de material particulado. Como los evidenciados levemente los días 1 de marzo o mayor variación en los días 26 y 28 de febrero. Estos cambios o valores más altos de material particulado por encima de los 300 o 400 metros, pueden ser causados a contaminantes residuales del día anterior o a contaminación procedente de fuera de la sabana de Bogotá.

3.2.3 Comparación sensores instalados en *UAV* con estación de referencia

Los vuelos realizados junto a la estación de calidad del aire de la DLIA capturaron información desde el nivel del suelo hasta los 500 metros de altura, desde el día 25 de febrero hasta el 4 de marzo. De los datos obtenidos se han tomado los datos reportados

por los sensores, en una altura de 15 a 25 metros. Este rango de alturas es tomado pues el monitoreo es desarrollado en movimiento y garantiza que al menos una medición se ha tomado entre estas dos alturas. De esta manera se han tomado un total de 51 datos en los que 1) al menos uno de los sensores ha capturado información, 2) se ha capturado información entre 15 y 25 metros de altura y 3) se encuentra registro de la concentración de $PM_{2.5}$ en la estación de referencia. Los datos recolectados por cada sensor y la correlación con la estación DLIA se encuentran en la Ilustración 3-31. La Ilustración 3-32 muestra el comportamiento de todo los datos y la ecuación que ajusta esos datos.

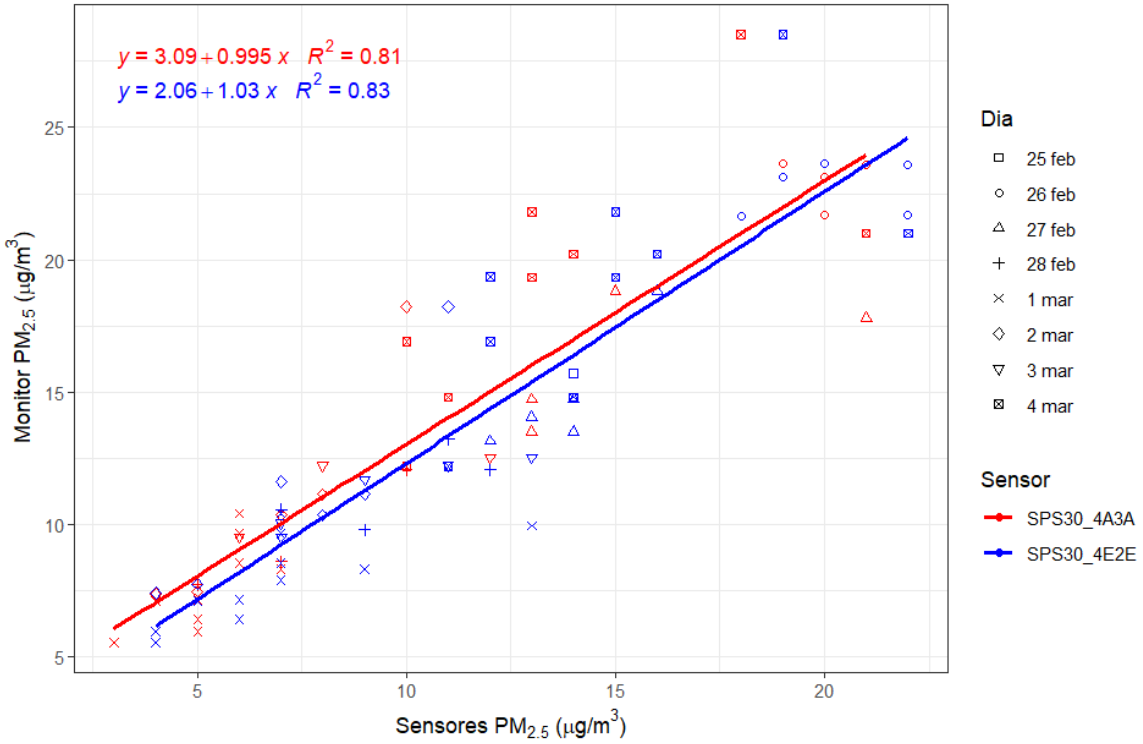


Ilustración 3-31 Correlación de datos capturados de $PM_{2.5}$ por los sensores en UAV entre 15 y 25 metros y la estación DLIA. 25 de febrero a 4 de marzo

Al extrapolar los criterios recomendados de error de sesgo y linealidad por la EPA para el uso de sensores de bajo costo; se determina que los sensores implementados en equipos UAV, tienen un comportamiento correcto y pueden ser utilizados para realizar la medición en esta plataforma.

Tabla 3-11 Criterios de aceptación de los sensores en asenso implementados en UAV basado en la comparación con la estación DLIA

Métrica	**Criterio**	**Valor deseable**	**Sensor**	**Valor obtenido**	**Conclusión**
Error de sesgo bias	Pendiente	1.0±0.35	4A3A 4E2E	0.995 1.03	Cumple
	Intercepto (µg/m³)	-5 ≤b≤5 µg/m³	4A3A 4E2E	3.09 2.06	Cumple
Linealidad	R^2	≥0.70	4A3A 4E2E	0.81 0.83	Cumple

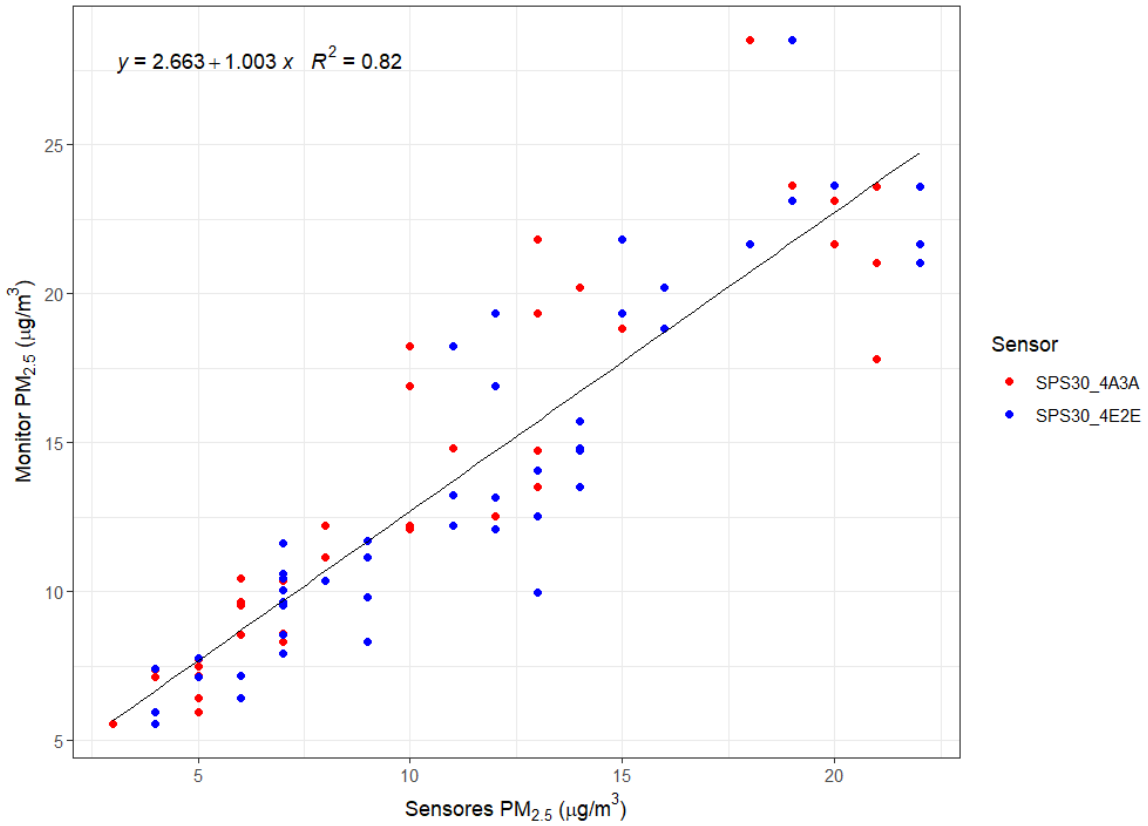


Ilustración 3-32 Correlación de datos promedio capturados de $PM_{2.5}$ en UAV entre 15 y 25 metros y la estación DLIA. 25 de febrero a 4 de marzo

Los sensores utilizados en UAV, subestiman las concentraciones reportadas por la estación de calidad del aire en aproximadamente 2.6 µg/m³., con un coeficiente de correlación de 0.82. Esto permite concluir que existen una variabilidad en los datos, a pesar de que la misma no sea alta. Esto puede ser causado por el régimen turbulento que es

desarrollado por las hélices del equipo *UAV*. Este régimen impacta de manera uniforme a los sensores implementados en la parte superior del equipo y por tanto las concentraciones reportadas. Esto se evidencia mediante una correlación alta entre los sensores (ver Ilustración 3-33).

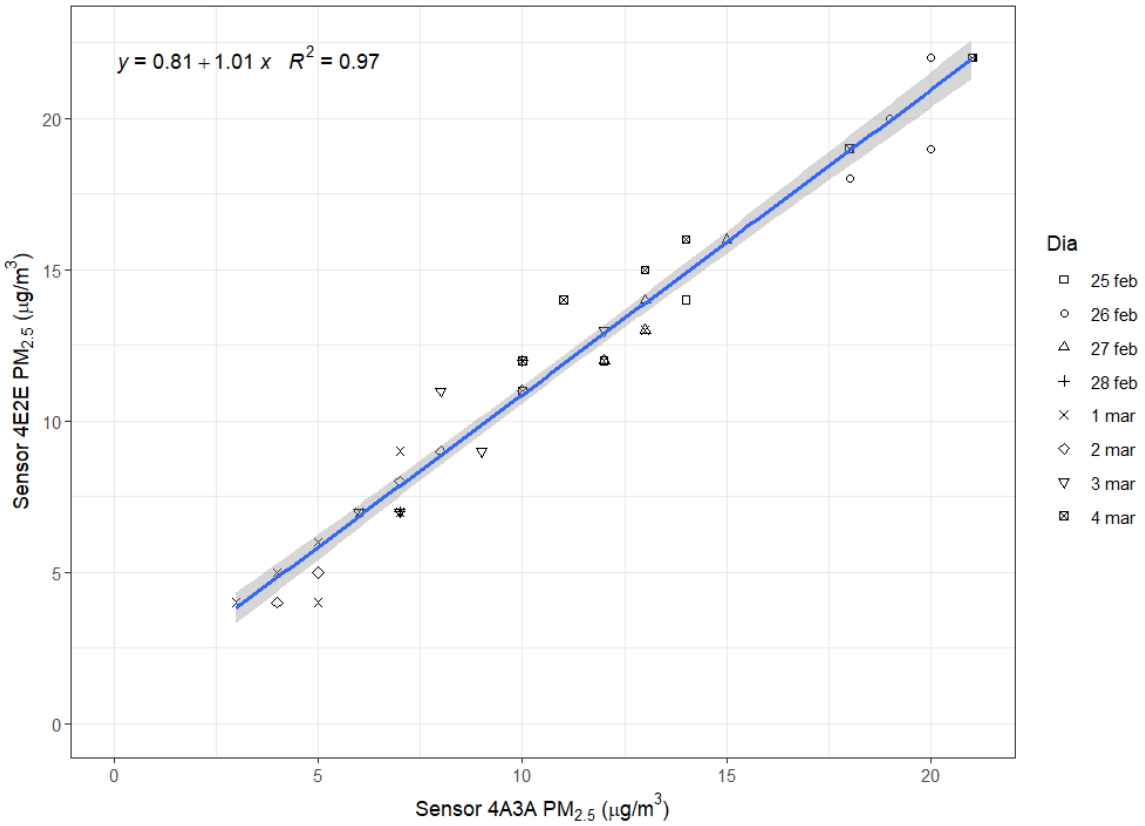


Ilustración 3-33 Correlación de datos promedio capturados de $PM_{2.5}$ con los sensores 4A3A y 4E3E entre 15 y 25 metros 25 de febrero a 4 de marzo

Así mismo los monitoreos de UAV deben ser ejecutados evitando que las turbulencias alcancen antes la masa que los sensores. Igualmente, la ubicación y disposición de los sensores debe minimizar el tiempo de lectura y respuesta de estos.

La comparación de los sensores en movimiento en *UAV*, permite concluir que la implementación del sensor en el cuerpo principal del drone representa de manera correcta la concentración de $PM_{2.5}$ en la atmosfera.

3.2.4 Medición de masas con concentración alta de material particulado

La validación realizada en las estaciones de Ráquira y DLIA permite determinar que los sensores estudiados permiten el monitoreo de $PM_{2.5}$. Igualmente ocurre con la implementación de sensores y su validación en movimiento en la estación de la DLIA. Esto permite establecer que la medición de perfiles verticales es posible y puede llevarse con la metodología usada. Sin embargo, en no todos los escenarios se ha detectado una homogeneidad en los datos reportados por los sensores. Esto ocurre en los monitoreos del 22 de febrero a las 7:30 (desarrollado en Bogotá, ver Ilustración 3.20) y 1 de marzo a 9:30am (desarrollado en Mosquera, ver Ilustración 3-21). Estos dos perfiles monitoreados comparten las siguientes características:

- El perfil inmediatamente anterior permite observar una atmosfera definida sin cambios abruptos en las concentraciones obtenidas por los diferentes sensores
- El perfil posterior no presenta diferencias altas entre las mediciones obtenidas por los sensores.
- El perfil de interés presenta un delta de concentración acumulado de material particulado superiores a 100 µg/m^3.

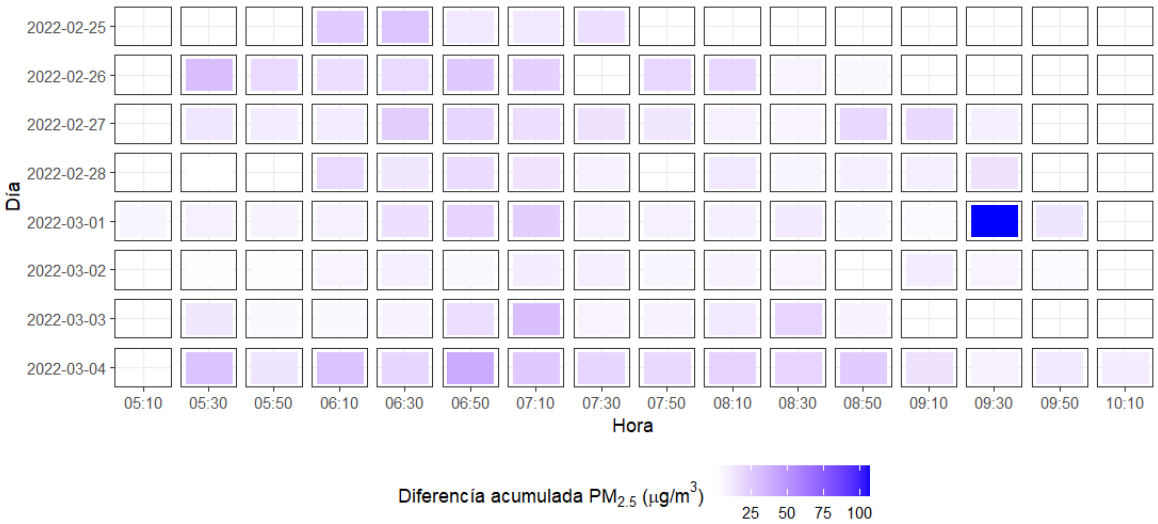


Ilustración 3-34 Deltas de concentración acumulado para los monitoreos realizados en el municipio de Mosquera

Debido a estas características, es posible afirmar que en estos perfiles se midió la presencia de una masa de aire o “burbuja” de alta concentración. Uno de sus posibles orígenes es la emisión de contaminantes en un corto periodo de tiempo; como las reportadas en los monitoreos del 2 de febrero. Estas burbujas se mueven rápidamente y aparecen en los monitoreos posteriores.

Estas masas de aire con alta concentración de material particulado representan un reto para los sensores implementados en *UAV*; pues se evidencian variaciones superiores a 10 µg/m^3 entre los sensores para una misma medición. Esto no corresponde a lo observado en concentraciones similares tanto en la validación realizada en la estación de calidad del aire como en lo obtenido cuando el sensor se encuentra en movimiento.

Por lo anterior, se puede afirmar que los estudios de masas de aire de alta concentración con sensores en UAV requieren una disposición mejor. Entre estas se puede evaluar la necesidad de “enfrentar” los sensores a la masa de aire, para lo cual se podrá implementar algoritmos como los propuestos anteriormente por otros autores [59]–[62],los cuales se basan en el procesamiento de los sensores propios de los UAV para la detección de la dirección del viento.

3.3 Comparación con alturas de modelación

La segmentación obtenida en cada uno de los perfiles se presenta como nueva información base para definir las alturas de modelamiento. Este nuevo criterio puede permitir representar de mejor manera las evolución espacial y temporal de los contaminantes criterios. Las altitudes que utiliza la secretaria Distrital de Ambiente de Bogotá en los primeros 1000 metros, en su dominio de modelación para el municipio de Mosquera y la ciudad de Bogotá se presentan en la Tabla 3-12. Estas capas de modelamiento incrementan su espesor a medida que aumentan en altitud.

Tabla 3-12 Alturas y espesores usados por la SDA para el modelamiento de calidad del aire

Capa	Altura	Espesor
1	0 m	0 m
2	67 m	67 m
3	158 m	91 m
4	275 m	117 m

Capa	Altura	Espesor
5	422 m	147 m
6	609 m	187 m
7	839 m	229 m

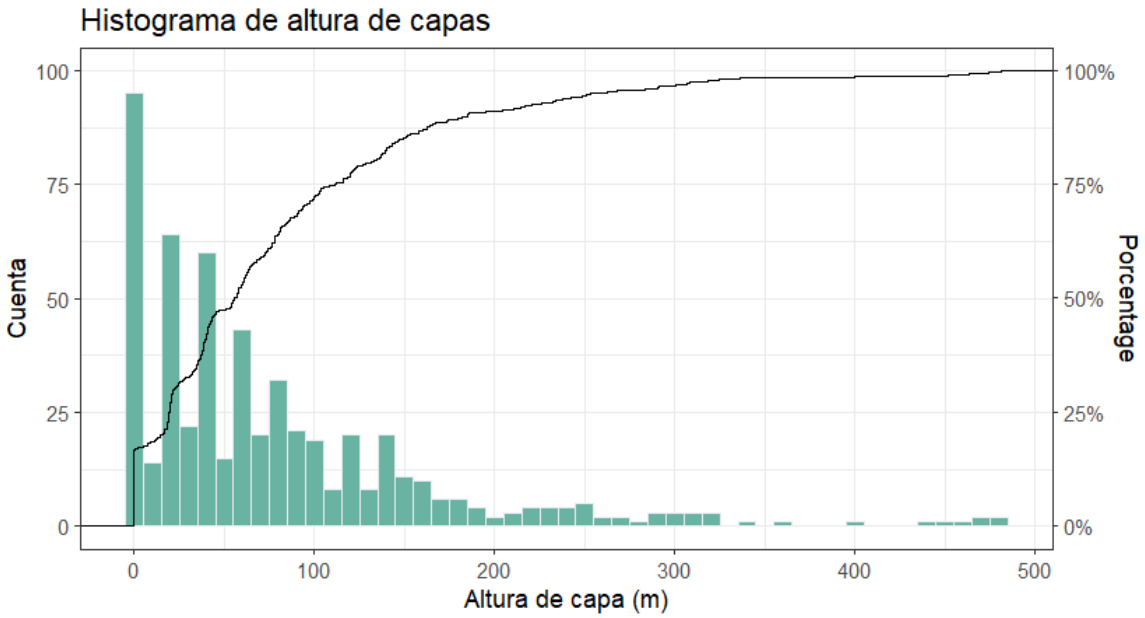


Ilustración 3-35 Histograma de distribución de espesores de capas obtenidas para los monitoreos del 25 de febrero a 4 de marzo

De las divisiones obtenidas para la atmosfera, se tiene que el 50% de las capas son de espesores menores a 60 metros (ver Ilustración 3-35). Esto contrasta con las alturas utilizadas para la modelación en la ciudad de Bogotá, la cual, la de menor espesor (de 67 metros) es la más próxima al suelo. Esto permite evidenciar que existe margen de mejora para que los modelos de calidad del aire puedan representar el material particulado en la atmosfera.

Tanto el desarrollo de perfiles verticales de material particulado en la atmosfera como su modelación con los perfile obtenidos mejoran el entendimiento que se tiene del transporte de estos contaminantes. El desarrollo de estudios de mayor tiempo y refinación en la segmentación atmosférica permitirá predecir la calidad del aire en escalas menores a las actuales. Los espesores obtenidos y presentados en la Ilustración 3-35, son una guía valiosa para lograr definir las alturas para mejorar el modelo de dispersión de calidad del aire. Sin embargo, se debe tener en cuenta que disminuir los espesores de modelación

representa un gasto computacional considerable, tanto en tiempo como en poder de cómputo requerido.

Adicional a esto, el monitoreo recurrente de los perfiles verticales permitirá evidenciar fenómenos locales que la modelación regional no predice. Es así como estos perfiles actúan como un puente de información valiosa para correlacionar los fenómenos que ocurren en el orden de kilómetros y correlacionarlos con los fenómenos locales de decenas de metros

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

Los sensores SPS30 utilizados son apropiados para la determinación de material particulado $PM_{2.5,}$ estos sensores presentan correlacione superiores a las recomendadas por la EPA para su uso en sistemas indicativos. Esto sucede para los tres promedios evaluados (días, horas y minutos). Este último promedio es el máximo que puede ser evaluado con los equipos disponibles, debido a que a la fecha no se cuenta con equipos de referencia con temporalidades menores.

Los sensores implementados en el *UAV* representan de manera satisfactoria las concentraciones reportadas por el equipo de referencia comparado en la altura de estudio. Estos sensores en las condiciones de monitoreo subestiman el material $PM_{2.5}$, sin embargo, se observa que la subestimación es consistente en todos los sensores y no supera los 3µg/m^3. Esto permite determinar que la ubicación (en el *UAV*) seleccionada para los sensores es afectada de forma homogénea por las posibles alteraciones aerodinámicas descritas por otros autores para la medición de concentraciones de fondo. Sin embargo, para la medición de material particulado en masas de aire contaminado o en plumas de contaminante, se recomienda el uso de algoritmos que permitan la captura del aire que eviten las posibles afectaciones aerodinámicas.

Los monitoreos para la determinación de perfiles de material particulado con equipos *UAV* o *drone*, se ven altamente afectados por la dirección en la que estos sean llevados a cabo. Esto es causa de las alteraciones aerodinámicas generadas por los propios rotores del equipo. Estos en la zona inferior del equipo, presentan grandes alteraciones, las cuales no permiten la medición adecuada de material particulado, debido al fuerte efecto de mezcla que se genera. Es por este motivo que las mediciones con equipos *drone* para material particulado, deben llevarse a cabo en la dirección contraria al *"downwash"* que generan los rotores.

En los monitoreos obtenidos, se identifica la formación de una zona de transición en las primeras horas de la mañana a nivel del suelo; y una zona de concentración constante encima de esta. Esta condición se presenta durante todos los días de monitoreo en algún momento antes de alcanzar las condiciones de homogeneidad en la atmosfera baja. Esto demuestra que al menos existen dos capas diferenciadas en la baja atmosfera las cuales varían en espesor y hora en la que se forman.

Los monitoreos realizados presentan la existencia de variaciones del material particulado en los primeros 100 metros de la atmosfera. En esta zona se presentan variaciones de hasta 20 $\mu g/m^3$. Esta variación no es tenida en cuenta por el modelo debido a la resolución utilizada. Es así como, si se utilizan mediciones de nivel del suelo para asumir la misma concentración en esta capa, se puede sobreestimar o subestimar las concentraciones a otras alturas. Debemos tener presente que estas variaciones son locales, y el alcance del modelo de pronóstico de calidad del aire, tiene un alcance regional. Sin embargo, estas capas son un insumo muy importante para el mejoramiento de los modelos a escalas menores y cerca al nivel del suelo.

4.2 Recomendaciones

Para trabajos futuros se deberá evaluar la posibilidad de operar un equipo que permita obtener las mediciones a una altura superior a los 500 metros, esto teniendo en cuenta que existen alteraciones detectadas superan esa altura. Adicionalmente se debe realizar la captura de material a estas alturas para identificar de manera adecuada el origen del material particulado, hacerlo en días consecutivos permitirá junto a la caracterización de este, determinar su origen.

Los sensores utilizados presentan condiciones adecuadas para el uso en *drones* y como equipos indicativos de calidad del aire. El fabricante manifiesta que estos sensores no requieren verificación y calibraciones posteriores a su puesta en marcha. Sin embargo, debido a la naturaleza de las mediciones en *drones*, donde se ha encontrado que los cambios de material particulado pueden ser mínimos, se recomienda realizar la verificación de los sensores.

Posteriores implementaciones de sensores de calidad del aire con *drones* o *UAV* deberán tener en cuenta que la masa de aire de estudio deberá ser monitoreada mediante sensores

o sondas alejadas del cuerpo principal del drone. Esta última opción deberá evitarse para no aumentar el tiempo de residencia del material particulado en el sensor

Bibliografía

[1] Organizacion Mundial de la Salud, “Actualización mundial 2005,” 2005. [Online]. Available: https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/69478/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf%0Ajsessionid=970454FA25DFB60943EBC3409FF7E87B?sequence=1.

[2] J. Schwartz, D. W. Dockery, and L. M. Neas, “Is Daily Mortality Associated Specifically with Fine Particles?,” *J. Air Waste Manage. Assoc.*, vol. 46, no. 10, pp. 927–939, 1996, doi: 10.1080/10473289.1996.10467528.

[3] World Health Organization, “Ambient air pollution attributable deaths,” 2016. https://www.who.int/data/gho/data/indicators/indicator-details/GHO/ambient-air-pollution-attributable-deaths (accessed Apr. 15, 2021).

[4] INS, “INS: 17,549 muertes en Colombia están asociadas a mala calidad del agua, del aire y a la exposición a combustibles pesados,” pp. 1–3, 2019.

[5] C. A. Pope III, R. T. Burnett, M. J. Thun, E. E. Calle, D. Krewski, and G. D. Thurston, “Lung Cancer, Cadiopulmonary Mortality and Long-term Exposure to Fine Particulate Air Pollution,” *J. Am. Med. Assoc.*, vol. 287, no. 9, pp. 1132–1141, 2002, [Online]. Available: http://jama.jamanetwork.com/article.aspx?doi=10.1001/jama.287.9.1132.

[6] B. Mundial, “Environmental Health Costs in Colombia: Changes from 2002 to 2010.” Washington DC, 2012, Accessed: Aug. 25, 2021. [Online]. Available: www.worldbank.org.

[7] J. O. Pinto *et al.*, “The status and future of small uncrewed aircraft systems (UAS) in operational meteorology,” *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, vol. 102, no. 11, pp. E2121–E2136, Nov. 2021, doi: 10.1175/BAMS-D-20-0138.1.

[8] World Meteorological Organization, “Statement of guidance for high-resolution numerical weather prediction (NWP).” WMO, p. 10, 2018.

[9] A. L. Houston, L. M. PytlikZillig, and J. C. Walther, “National weather service data needs for short-term forecasts and the role of unmanned aircraft in filling the gap: Results from a nationwide survey,” *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, vol. 102, no. 11, pp. E2106–E2120, Nov. 2021, doi: 10.1175/BAMS-D-20-0183.1.

[10] University of Wyoming, “University of Wyoming - Radiosonde Data,” 2022. http://weather.uwyo.edu/cgi-bin/sounding?region=samer&TYPE=TEXT%3ALIST&YEAR=2021&MONTH=08&FROM=1212&TO=1012&STNM=80222 (accessed Jul. 10, 2022).

[11] Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales, “RADIOSONDEOS COLOMBIA - IDEAM,” 2022. http://www.meteoaeronautica.gov.co/radiosondeos-colombia (accessed Jul. 10, 2022).

[12] S. A. H. Mohsan, M. A. Khan, F. Noor, I. Ullah, and M. H. Alsharif, “Towards the Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Comprehensive Review,” *Drones*, vol. 6, no. 6, p. 147, Jun. 2022, doi: 10.3390/drones6060147.

[13] T. Watai, T. Machida, N. Ishizaki, and G. Inoue, “A lightweight observation system for atmospheric carbon dioxide concentration using a small unmanned aerial vehicle,” *J. Atmos. Ocean. Technol.*, vol. 23, no. 5, pp. 700–710, 2006, doi: 10.1175/JTECH1866.1.

[14] V. Lambey and A. D. Prasad, “A Review on Air Quality Measurement Using an Unmanned Aerial Vehicle,” *Water, Air, and Soil Pollution*, vol. 232, no. 3. 2021, doi: 10.1007/s11270-020-04973-5.

[15] R. Cichowicz and M. Dobrzański, “Spatial analysis (Measurements at heights of 10 m and 20 m above ground level) of the concentrations of particulate matter (PM10, PM2.5, and PM1.0) and gaseous pollutants (H2s) on the university campus: A case study,” *Atmosphere (Basel).*, vol. 12, no. 1, p. 62, Jan. 2021, doi: 10.3390/atmos12010062.

[16] L. Jin *et al.*, “Unmanned aerial vehicle observations of the vertical distribution of

particulate matter in the surface layer of the Taklimakan Desert in China," *Atmosphere (Basel).*, vol. 11, no. 9, p. 980, Sep. 2020, doi: 10.3390/atmos11090980.

[17] T. Wang *et al.*, "Unmanned aerial vehicle-borne sensor system for atmosphere-particulate-matter measurements: Design and experiments," *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, no. 1, 2020, doi: 10.3390/s20010057.

[18] C. Liu *et al.*, "Vertical distribution of PM2.5 and interactions with the atmospheric boundary layer during the development stage of a heavy haze pollution event," *Sci. Total Environ.*, vol. 704, 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135329.

[19] G. Rohi, O. Ejofodomi, and G. Ofualagba, "Autonomous monitoring, analysis, and countering of air pollution using environmental drones," *Heliyon*, vol. 6, no. 1, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e03252.

[20] B. Li *et al.*, "Use of Multi-Rotor Unmanned Aerial Vehicles for Fine-Grained Roadside Air Pollution Monitoring," *Transp. Res. Rec.*, vol. 2673, no. 7, pp. 169–180, 2019, doi: 10.1177/0361198119847991.

[21] Q. Gu and C. Jia, "A Consumer UAV-based Air Quality Monitoring System for Smart Cities," Mar. 2019, doi: 10.1109/ICCE.2019.8662050.

[22] D. Wang, Z. Wang, Z. R. Peng, and D. Wang, "Using unmanned aerial vehicle to investigate the vertical distribution of fine particulate matter," *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 17, no. 1, pp. 219–230, Jan. 2020, doi: 10.1007/s13762-019-02449-6.

[23] Y. Zhu *et al.*, "Measurements of atmospheric aerosol vertical distribution above North China Plain using hexacopter," *Sci. Total Environ.*, vol. 665, pp. 1095–1102, 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.02.100.

[24] G. P. Mayuga, C. Favila, C. Oppus, E. Macatulad, and L. H. Lim, "Airborne Particulate Matter Monitoring Using UAVs for Smart Cities and Urban Areas," *IEEE Reg. 10 Annu. Int. Conf. Proceedings/TENCON*, vol. 2018-Octob, no. October, pp. 1398–1402, 2019, doi: 10.1109/TENCON.2018.8650293.

[25] L. Y. Chen, H. S. Huang, C. J. Wu, Y. T. Tsai, and Y. S. Chang, "A LoRa-Based Air Quality Monitor on Unmanned Aerial Vehicle for Smart City," Nov. 2018, doi:

10.1109/ICSSE.2018.8519967.

[26] X. B. Li, D. S. Wang, Q. C. Lu, Z. R. Peng, and Z. Y. Wang, “Investigating vertical distribution patterns of lower tropospheric PM2.5 using unmanned aerial vehicle measurements,” *Atmos. Environ.*, vol. 173, pp. 62–71, 2018, doi: 10.1016/j.atmosenv.2017.11.009.

[27] J. B. Babaan, J. P. Ballori, A. M. Tamondong, R. V. Ramos, and P. M. Ostrea, “Estimation of PM 2.5 vertical distribution using customized UAV and mobile sensors in Brgy. UP Campus, Diliman, Quezon City,” in *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, Oct. 2018, vol. 42, no. 4/W9, pp. 89–103, doi: 10.5194/isprs-archives-XLII-4-W9-89-2018.

[28] S. M. Krishna, M. Gangadhar, and C. V. K. Rao, “Ambient air quality monitoring PM2.5 with quadcopter in rajam town of srikakulam district of andhra pradesh,” *Int. J. Mech. Eng. Technol.*, vol. 9, no. 4, pp. 780–785, 2018, Accessed: May 30, 2021. [Online]. Available: http://iaeme.com/Home/journal/IJMET780editor@iaeme.comhttp://iaeme.com/Home/issue/IJMET?Volume=9&Issue=4http://iaeme.com/Home/issue/IJMET?Volume=9&Issue=4http://iaeme.com/Home/journal/IJMET781.

[29] T. F. Villa, E. R. Jayaratne, L. F. Gonzalez, and L. Morawska, “Determination of the vertical profile of particle number concentration adjacent to a motorway using an unmanned aerial vehicle,” *Environ. Pollut.*, vol. 230, pp. 134–142, 2017, doi: 10.1016/j.envpol.2017.06.033.

[30] S. Qiu, B. Chen, R. Wang, Z. Zhu, Y. Wang, and X. Qiu, “Estimating contaminant source in chemical industry park using UAV-based monitoring platform, artificial neural network and atmospheric dispersion simulation,” *RSC Adv.*, vol. 7, no. 63, pp. 39726–39738, Aug. 2017, doi: 10.1039/c7ra05637k.

[31] M. Alvarado, F. Gonzalez, P. Erskine, D. Cliff, and D. Heuff, “A methodology to monitor airborne PM10 dust particles using a small unmanned aerial vehicle,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 17, no. 2, p. 343, Feb. 2017, doi: 10.3390/s17020343.

[32] J. Aurell, W. Mitchell, V. Chirayath, J. Jonsson, D. Tabor, and B. Gullett, “Field

determination of multipollutant, open area combustion source emission factors with a hexacopter unmanned aerial vehicle," *Atmos. Environ.*, vol. 166, pp. 433–440, 2017, doi: 10.1016/j.atmosenv.2017.07.046.

[33] K. Weber, G. Heweling, C. Fischer, and M. Lange, "The use of an octocopter UAV for the determination of air pollutants--a case study of the traffic induced pollution plume around a river bridge in Duesseldorf, Germany," *Int. J. Environ. Sci.*, vol. 2, pp. 63–68, 2017, Accessed: Jun. 02, 2021. [Online]. Available: http://www.iaras.org/iaras/journals/ijes.

[34] Y. Yang, Z. Zheng, K. Bian, L. Song, and Z. Han, "Real-Time Profiling of Fine-Grained Air Quality Index Distribution Using UAV Sensing," *IEEE Internet Things J.*, vol. 5, no. 1, pp. 186–198, Feb. 2018, doi: 10.1109/JIOT.2017.2777820.

[35] J. M. Brady, M. D. Stokes, J. Bonnardel, and T. H. Bertram, "Characterization of a Quadrotor Unmanned Aircraft System for Aerosol-Particle-Concentration Measurements," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 50, no. 3, pp. 1376–1383, Feb. 2016, doi: 10.1021/acs.est.5b05320.

[36] M. Alvarado, F. Gonzalez, A. Fletcher, and A. Doshi, "Towards the development of a low cost airborne sensing system to monitor dust particles after blasting at open-pit mine sites," *Sensors (Switzerland)*, vol. 15, no. 8, pp. 19667–19687, 2015, doi: 10.3390/s150819667.

[37] B. Altstädter *et al.*, "ALADINA - An unmanned research aircraft for observing vertical and horizontal distributions of ultrafine particles within the atmospheric boundary layer," *Atmos. Meas. Tech.*, vol. 8, no. 4, pp. 1627–1639, Apr. 2015, doi: 10.5194/amt-8-1627-2015.

[38] W. A. Harrison, D. J. Lary, B. J. Nathan, and A. G. Moore, "Using remote control aerial vehicles to study variability of airborne particulates," *Air, Soil Water Res.*, vol. 8, no. 8, pp. 43–51, Aug. 2015, doi: 10.4137/ASWR.S30774.

[39] C. C. Peng and C. Y. Hsu, "Integration of an unmanned vehicle and its application to real-time gas detection and monitoring," in *2015 IEEE International Conference on Consumer Electronics - Taiwan, ICCE-TW 2015*, Aug. 2015, pp. 320–321, doi:

10.1109/ICCE-TW.2015.7216921.

[40] P. Haas, C. Balistreri, P. Pontelandolfo, and G. Triscone, “Development of an unmanned aerial vehicle UAV for air quality measurements in urban areas,” *Am. Inst. Aeronaut. Astronaut.*, no. June, pp. 1–9, 2014, doi: https://doi.org/10.2514/6.2014-2272.

[41] T. S. Bates *et al.*, “Measurements of atmospheric aerosol vertical distributions above Svalbard, Norway, using unmanned aerial systems (UAS),” *Atmos. Meas. Tech.*, vol. 6, no. 8, pp. 2115–2120, 2013, doi: 10.5194/amt-6-2115-2013.

[42] T. F. Villa, F. Salimi, K. Morton, L. Morawska, and F. Gonzalez, “Development and validation of a UAV based system for air pollution measurements,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 16, no. 12, p. 2202, Dec. 2016, doi: 10.3390/s16122202.

[43] L. Barbieri *et al.*, “Intercomparison of small unmanned aircraft system (sUAS) measurements for atmospheric science during the LAPSE-RATE campaign,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 19, no. 9, p. 2179, May 2019, doi: 10.3390/s19092179.

[44] B. R. Greene, A. R. Segales, T. M. Bell, E. A. Pillar-Little, and P. B. Chilson, “Environmental and sensor integration influences on temperature measurements by rotary-wing unmanned aircraft systems,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 19, no. 6, p. 1470, Mar. 2019, doi: 10.3390/s19061470.

[45] A. L. Houston and J. M. Keeler, “The impact of sensor response and airspeed on the representation of the convective boundary layer and airmass boundaries by small unmanned aircraft systems,” *J. Atmos. Ocean. Technol.*, vol. 35, no. 8, pp. 1687–1699, Aug. 2018, doi: 10.1175/JTECH-D-18-0019.1.

[46] DNP, “Calidad del Aire. Una prioridad de Politica Publica en Colombia,” in *Calidad del aire una prioridad de politica publica en Colombia*, 2018, p. 69, [Online]. Available: https://www.dnp.gov.co/Portals/0/archivos/documentos/Subdireccion/Conpes/3582.pdf.

[47] Secretaria Distrital de Ambiente, “INFORME MENSUAL DE LA RED DE MONITOREO DE CALIDAD DEL AIRE DE BOGOTÁ-RMCAB ENERO 2022,” 2022.

Accessed: Jul. 10, 2022. [Online]. Available: http://rmcab.ambientebogota.gov.co/Pagesfiles/informe mensual enero 2022.pdf.

[48] Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, “BOLETÍN MENSUAL DE CALIDAD DEL AIRE CAR,” Bogotá, 2022. Accessed: Jul. 10, 2022. [Online]. Available: https://www.car.gov.co/uploads/files/621ce1887729b.pdf.

[49] R. Duvall *et al.*, *Performance Testing Protocols, Metrics, and Target Values for Fine Particulate Matter Air Sensors: Use in Ambient, Outdoor, Fixed Sites, Non-Regulatory Supplemental and Informational Monitoring Applications*. EPA, 2021.

[50] R. Williams *et al.*, “Peer Review and Supporting Literature Review of Air Sensor Technology Performance Targets,” no. September, p. 33, 2018, [Online]. Available: https://www.epa.gov/sites/production/files/2018-10/documents/peer_review_and_supporting_literature_review_of_air_sensor_technology_performance_targets.pdf.

[51] Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, “Histórico de series hidrometeorológicas | CAR,” 2018. https://www.car.gov.co/vercontenido/2524 (accessed Sep. 26, 2021).

[52] DJI, “Matrice 600 Pro - User Manual,” 2022.

[53] Matrice 600 Pro, “Matrice 600 Pro - Product Information - DJI,” 2021. https://www.dji.com/matrice600/info#downloads (accessed Jul. 03, 2022).

[54] W. S. Cleveland, E. Grosse, and W. M. Shyu, “Local Regression Models,” in *Statistical Models in S*, 1st Editio., T. J. H. John M. Chambers, Ed. New York: Routledge, 1992.

[55] “Numerical Differentiation Introduction in R.” https://rstudio-pubs-static.s3.amazonaws.com/295650_406b32cdd2d34ca3a150bbe95010d665.html (accessed Mar. 15, 2022).

[56] US EPA, “List of designated reference and equivalent methods. United State Environmental Protection Agency, available at: http://www.epa.gov/ttn/amtic/files/ambient/criteria/reference-equivalent-methods-

list.pdf," 2014, Accessed: Mar. 15, 2022. [Online]. Available: www.epa.gov/ttn/amtic/criteria.html.

[57] L. Wang, M. Xu, Q. Hou, Z. Wang, Y. Lan, and S. Wang, "Numerical verification on influence of multi-feature parameters to the downwash airflow field and operation effect of a six-rotor agricultural UAV in flight," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 190, p. 106425, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.compag.2021.106425.

[58] Q. Guo *et al.*, "CFD simulation and experimental verification of the spatial and temporal distributions of the downwash airflow of a quad-rotor agricultural UAV in hover," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 172, May 2020, doi: 10.1016/j.compag.2020.105343.

[59] P. P. Neumann and M. Bartholmai, "Real-time wind estimation on a micro unmanned aerial vehicle using its inertial measurement unit," *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 235, pp. 300–310, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.sna.2015.09.036.

[60] L. N. C. Sikkel, G. C. H. E. De Croon, C. De Wagter, and Q. P. Chu, "A novel online model-based wind estimation approach for quadrotor micro air vehicles using low cost MEMS IMUs," in *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Nov. 2016, vol. 2016-Novem, pp. 2141–2146, doi: 10.1109/IROS.2016.7759336.

[61] Y. Qu, Z. Xing, Y. Zhang, and Z. Yu, "Real-time wind vector estimation for a micro UAV," in *2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems, ICUAS 2017*, Jul. 2017, pp. 1716–1721, doi: 10.1109/ICUAS.2017.7991356.

[62] M. Simma, H. Mjøen, and T. Boström, "Measuring wind speed using the internal stabilization system of a quadrotor drone," *Drones*, vol. 4, no. 2. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, pp. 1–10, Jun. 16, 2020, doi: 10.3390/drones4020023.

5. Anexo A: Validación sensores

A. Estación calidad del aire Dirección de Laboratorio e Innovación Ambiental

El análisis realizado es hecho entre el día 17/02/2022 y el día 24/02/2022 en la estación de la Dirección de Laboratorio e Innovación Ambiental de la CAR

a. Serie de tiempo

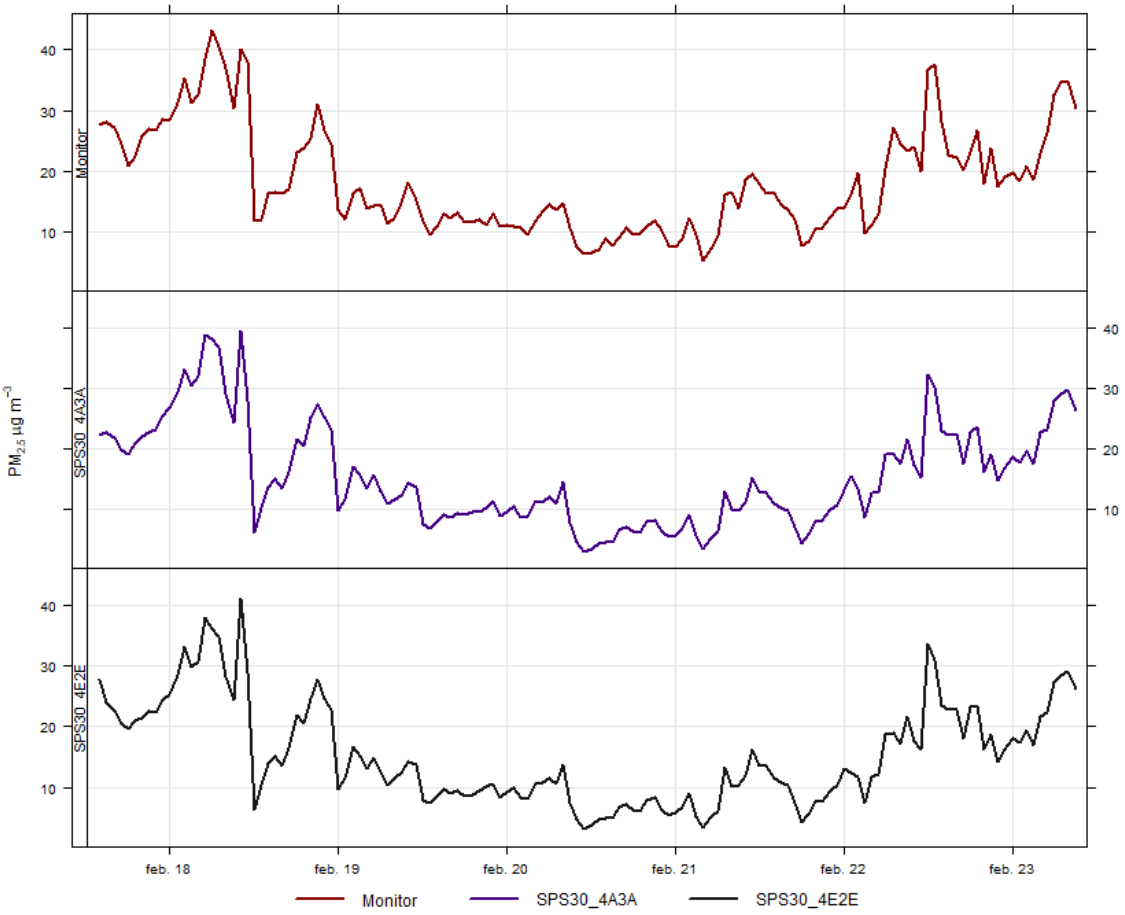


Ilustración 5-1 Promedios horarios de $PM_{2.5}$ en la estación de DLIA y los sensores validados

b. Gráficos de correlación horaria

Atributo	Valor
Promedio despliegue	15.45
datos_validos	280
desviación de sensores	0.41
CV sensores	2.63

i. Sensor SPS30_4A3A

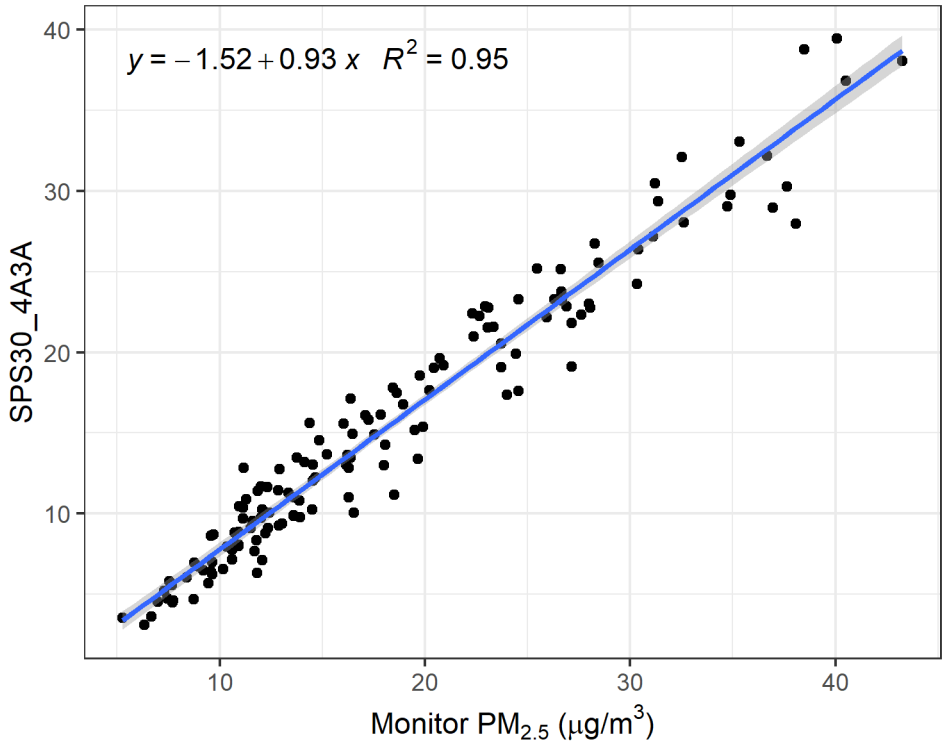


Ilustración 5-2 Correlación horaria sensor 1 SPS_30 4A3A con monitor de referencia, Estación DLIA

Intercepto	Pendiente	Coeff
-1.516348	0.9296877	0.9498533

ii. Sensor SPS30_4E2E

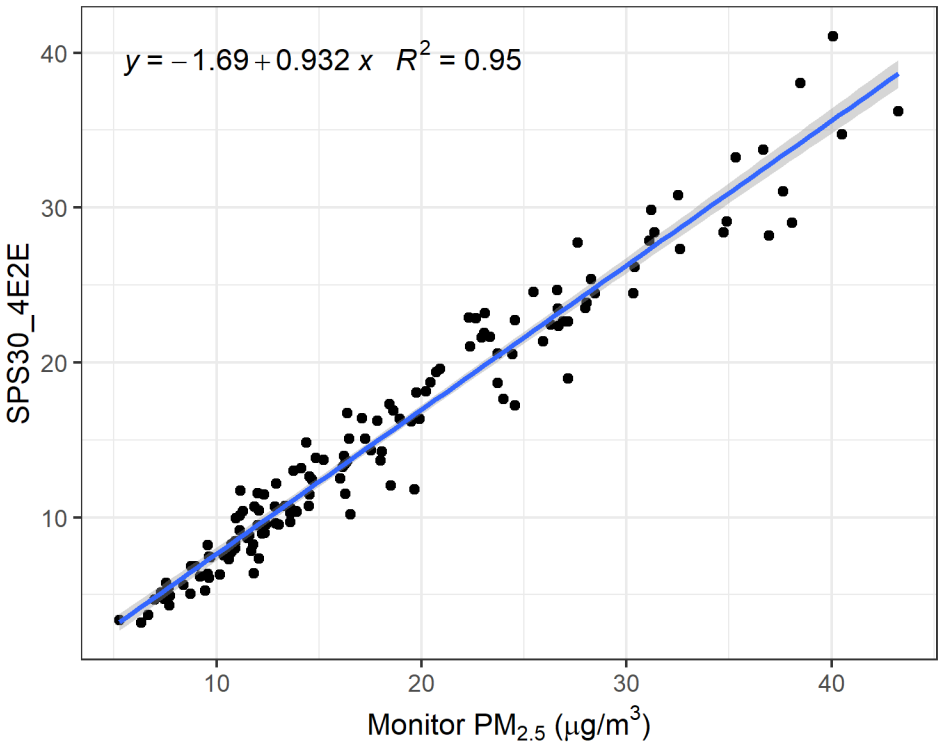


Ilustración 5-3 Correlación horaria sensor 1 SPS_30 4E2E con monitor de referencia, Estación DLIA

Intercepto	Pendiente	Coeff
-1.686721	0.9322129	0.9547607

iii. Error medio cuadratico horario

RMSE	NRMSE
3.459021	18.88244

c. Porcentaje de datos capturados y analizados

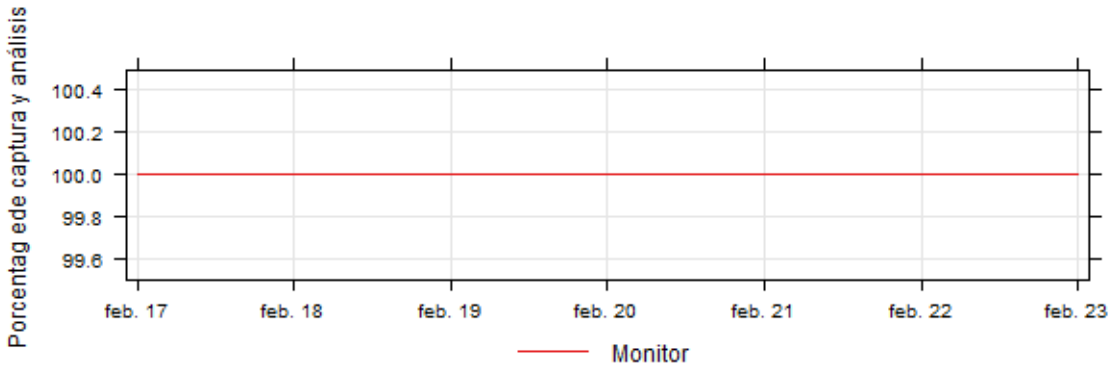


Ilustración 5-4 Porcentaje de datos capturados en el monitoreo de la Estación DLIA

d. Gráficos de correlación diaria

Atributo	Valor
Promedio despliegue diario	16.65
Dias validos	14
Desviación de sensores	0.18
CV sensores	1.08

i. Sensor SPS30_4A3A promedios diarios

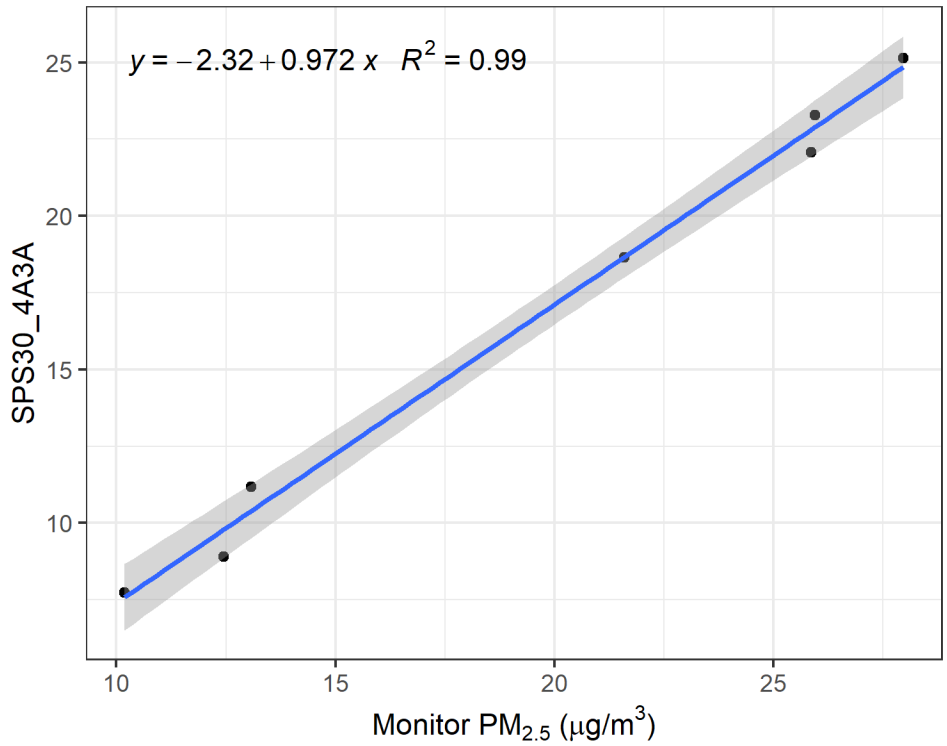


Ilustración 5-5 Correlación diaria sensor 1 SPS_30 4A3A con monitor de referencia, Estación DLIA

Intercepto	Pendiente	Coeff
-2.316523	0.9715048	0.9931408

ii. Sensor SPS30_4E2E promedios diarios

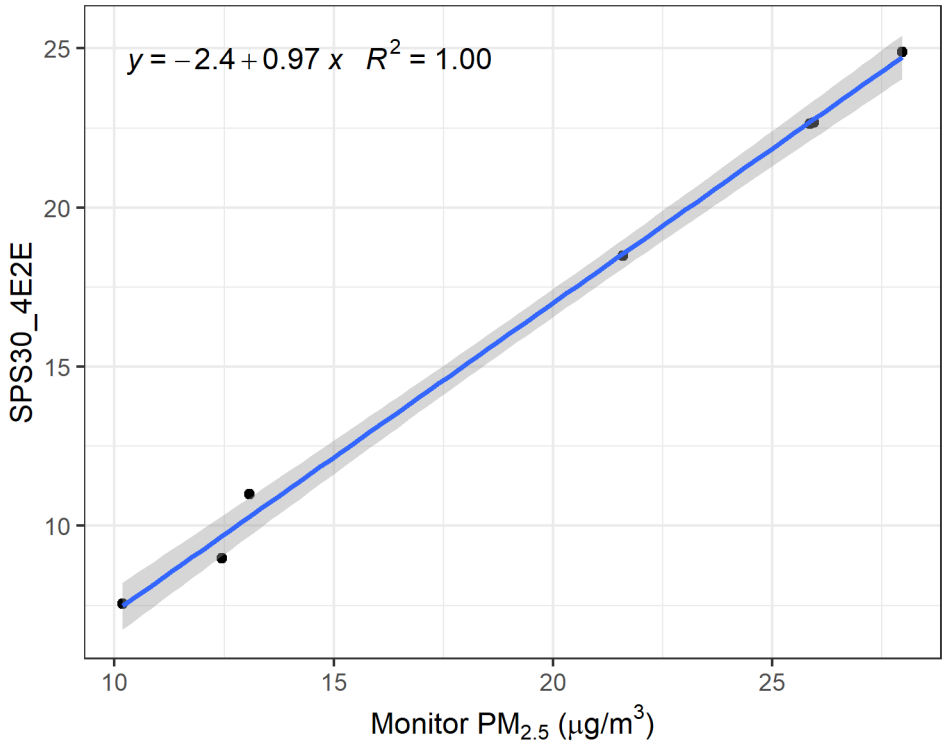


Ilustración 5-6 Correlación diaria sensor 1 SPS_30 4E2E con monitor de referencia, Estación DLIA

Intercepto	Pendiente	Coeff
-2.402067	0.9703387	0.996792

iii. Error medio cuadrático diario

RMSE_dia	NRMSE_dia
2.974825	15.1915

e. Validaciones minútales

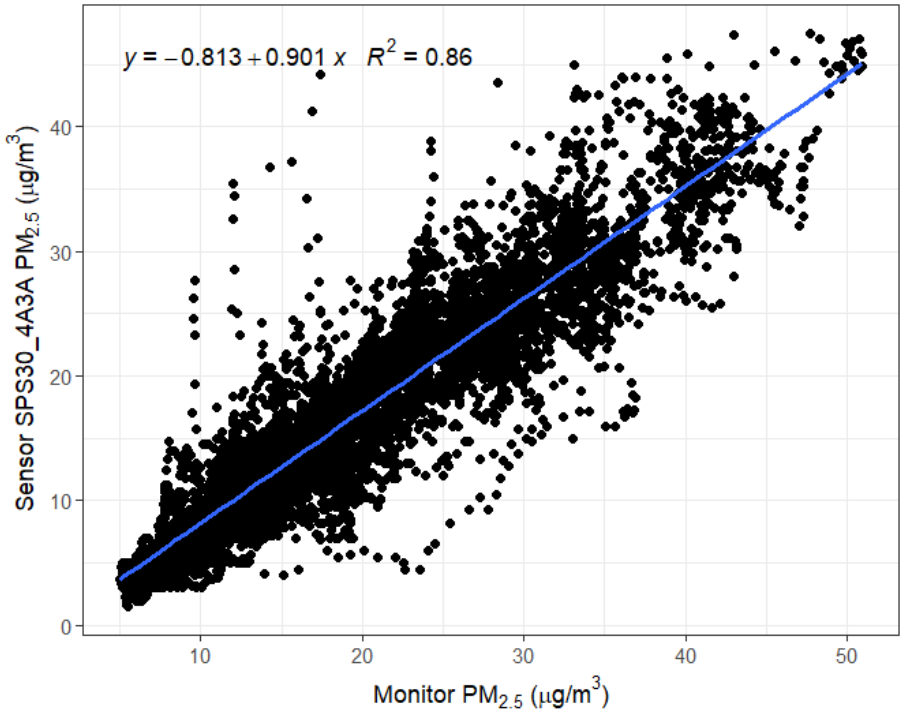


Ilustración 5-7 Correlación minutal sensor SPS_30 4A3A con monitor de referencia, Estación DLIA

Intercepto	Pendiente	Coeff
-0.813	0.901	0.86

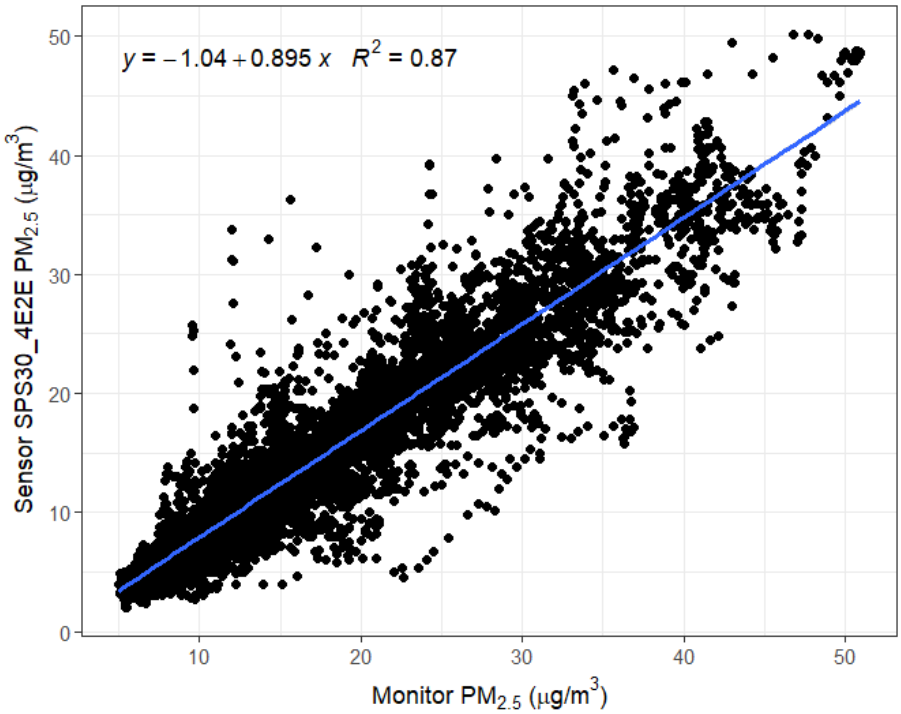


Ilustración 5-8 Correlación minutal sensor SPS_30 4E2E con monitor de referencia, Estación DLIA

Intercepto	Pendiente	Coeff
-1.04	0.895	0.87

f. Comparación sensores temporalidad minutal

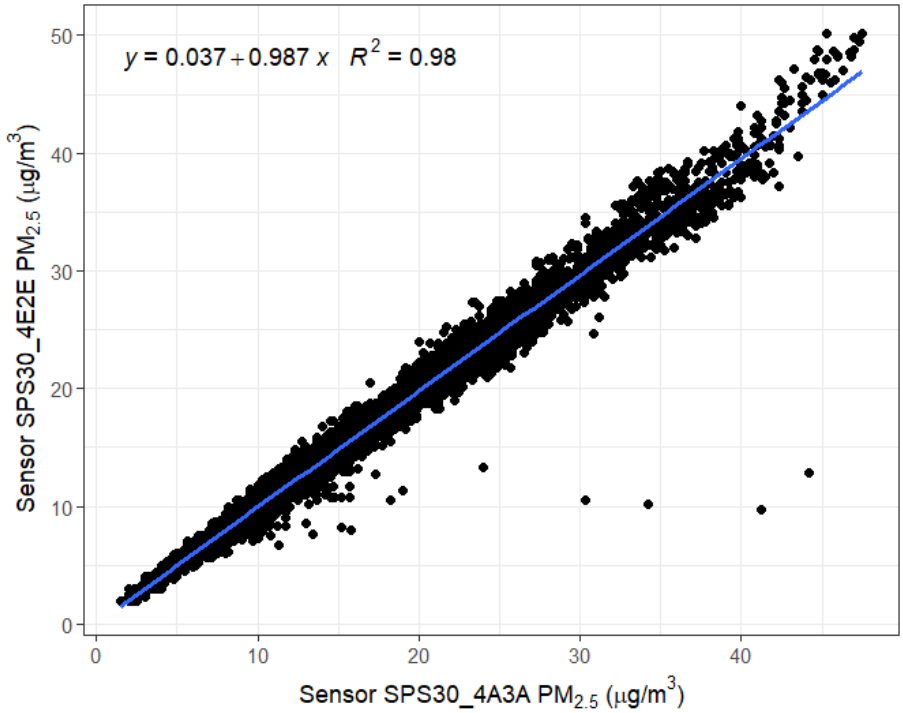


Ilustración 5-9 Dispersión sensores utilizados en la Estación DLIA

B. Estación calidad del aire Municipio de Ráquira

El análisis realizado es hecho entre el día 14/10/2021 y el día 30/10/2021

a. Serie de tiempo

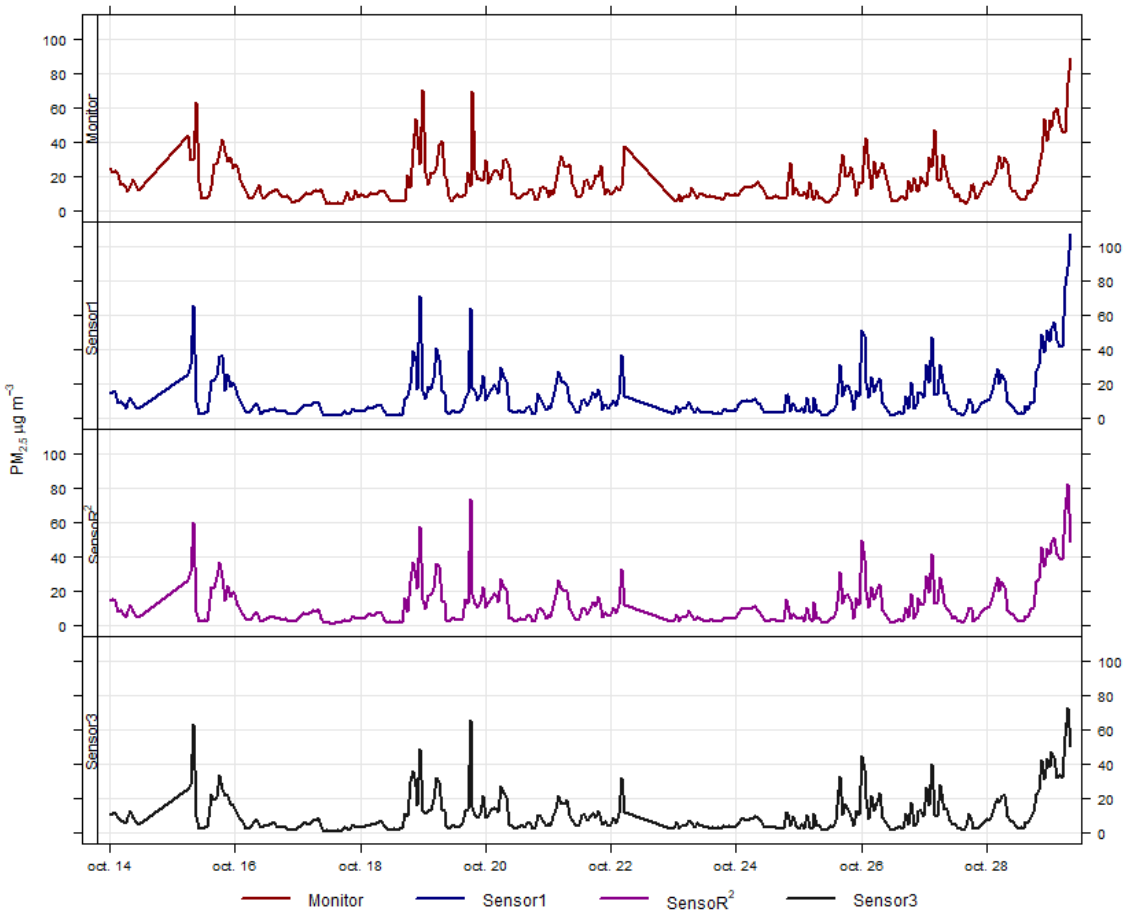


Ilustración 5-10 Promedios horarios de PM2.5 en la estación de Raquirá y los sensores validados

b. Gráficos de correlación horaria

Atributo	Valor
Promedio despliegue	11.27
datos_validos	996
desviación de sensores	2.1
CV sensores	18.64

i. Sensor SPS30_4A3A

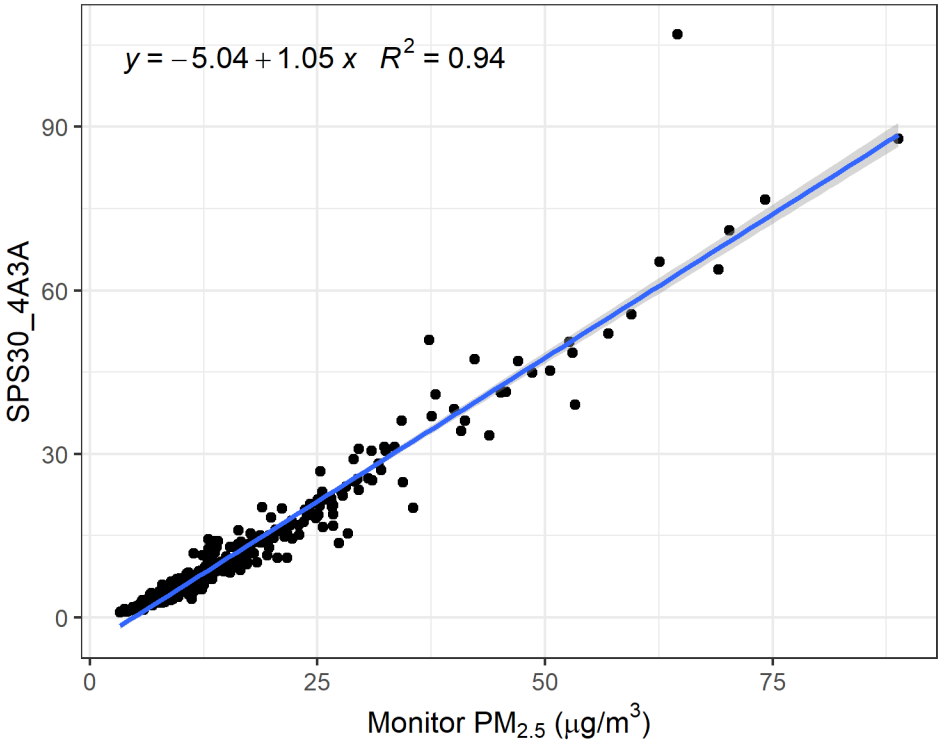


Ilustración 5-11 Correlación horaria sensor 1 SPS_30 4A3A con monitor de referencia, Estación Ráquira

Intercepto	Pendiente	Coeff
-5.042052	1.053908	0.9380782

ii. 1Sensor SPS30_473B

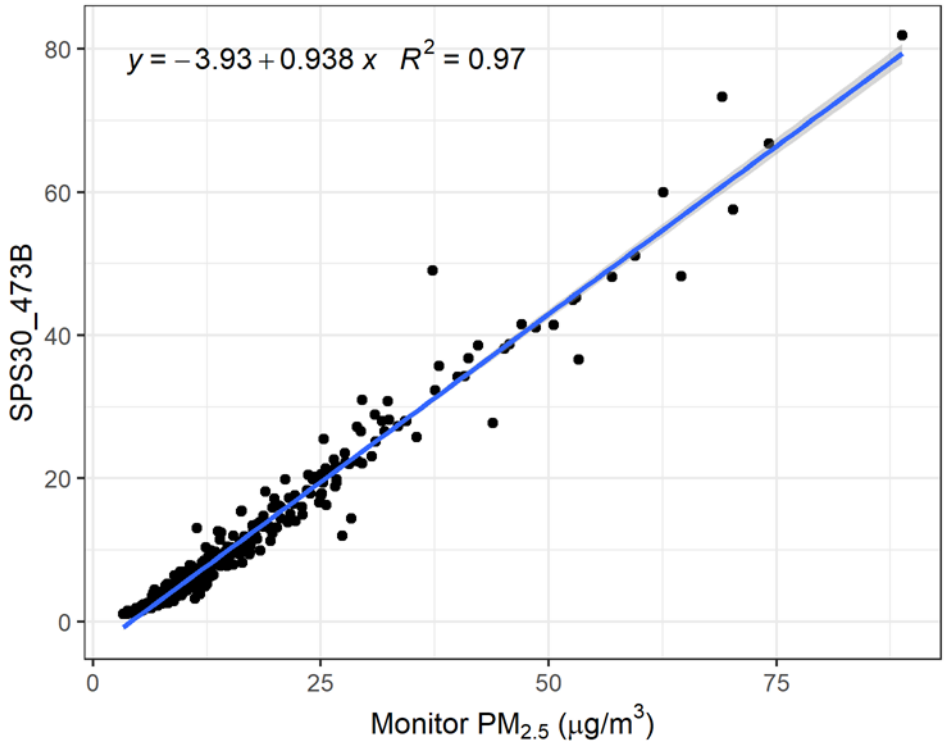


Ilustración 5-12 Correlación horaria sensor 2 SPS_30 4E2E con monitor de referencia, Estación Ráquira

Intercepto	Pendiente	Coeff
-3.928498	0.9381242	0.9660815

iii. Sensor SPS30_4E2E

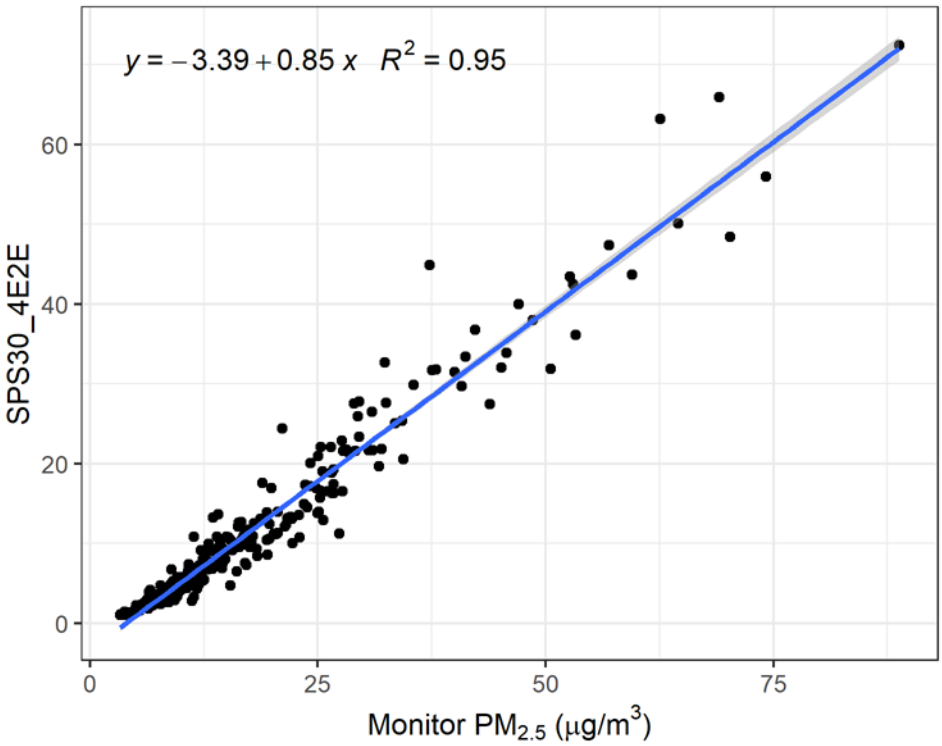


Ilustración 5-13 Correlación horaria sensor 3 SPS_30 473B con monitor de referencia, Estación Ráquira

Intercepto	Pendiente	Coeff
-3.390123	0.8495166	0.9512638

iv. Error medio cuadratico horario

RMSE	NRMSE
5.893258	36.26587

c. Porcentaje de datos capturados y analizados

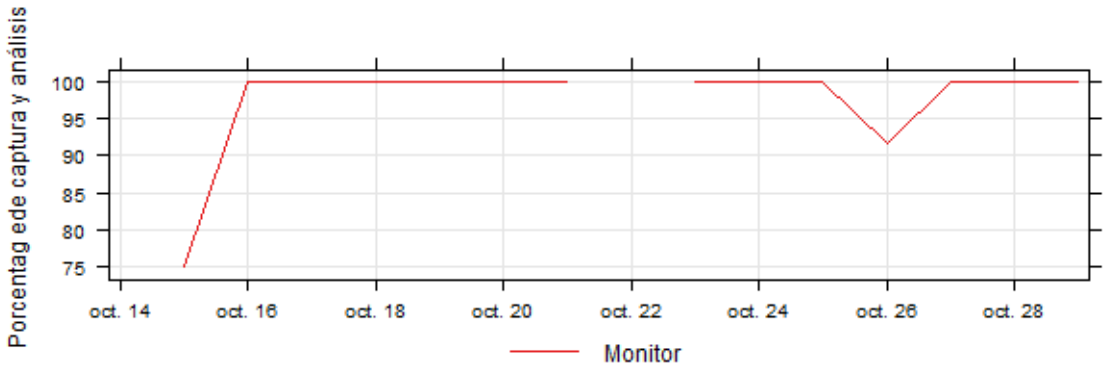


Ilustración 5-14 Porcentaje de datos capturados en el monitoreo de la Estación Ráquira

d. Gráficos de correlación diaria

Atributo	Valor
Promedio despliegue diario	13.34
Dias validos	42
Desviación de sensores	1.91
CV sensores	14.33

i. Sensor SPS30_4A3A promedios diarios

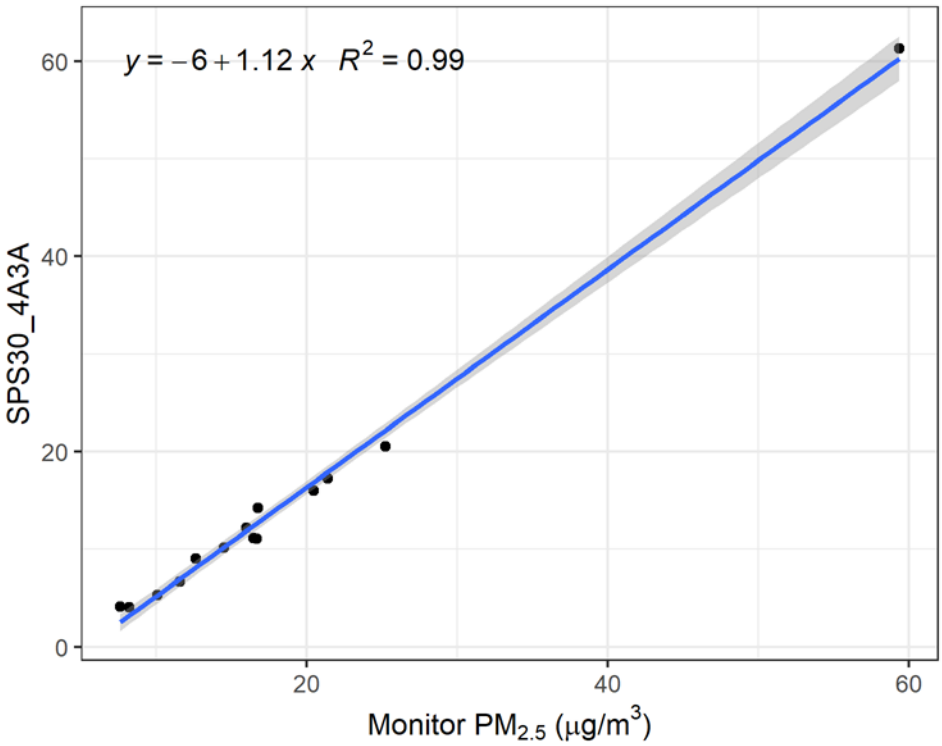


Ilustración 5-15 Correlación diaria sensor 1 SPS_30 4A3A con monitor de referencia, Estación Ráquira

Intercepto	Pendiente	Coeff
-5.99595	1.116613	0.9942465

ii. Sensor SPS30_473B promedios diarios

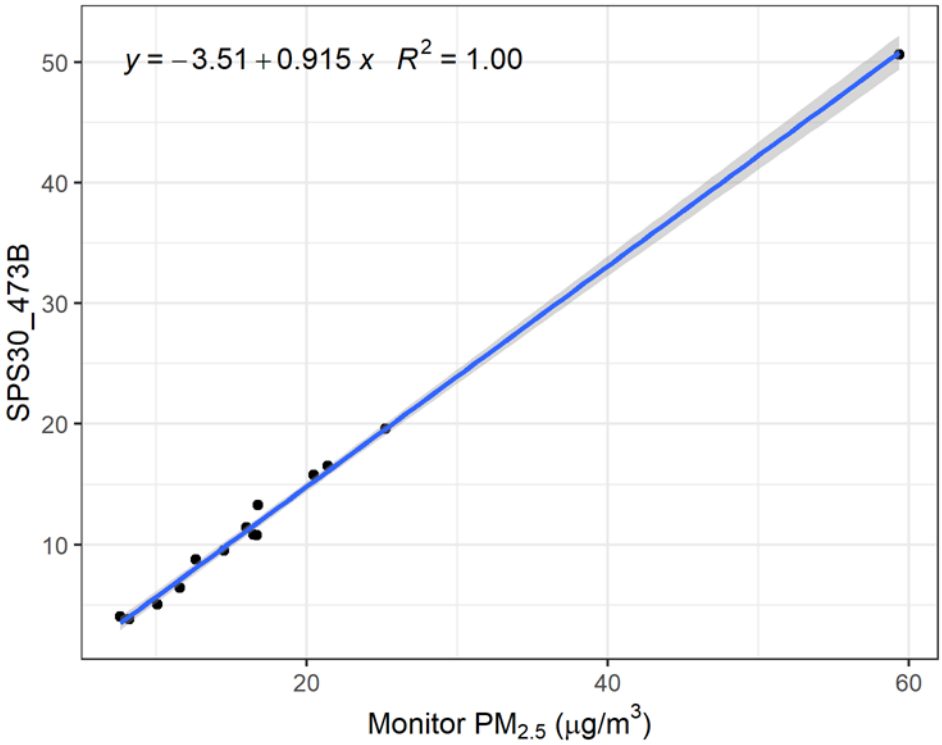


Ilustración 5-16 Correlación diaria sensor 2 SPS_30 473B con monitor de referencia, Estación Ráquira

Intercepto	Pendiente	Coeff
-3.505146	0.9151516	0.9966563

iii. Sensor SPS30_4E2E promedios diarios

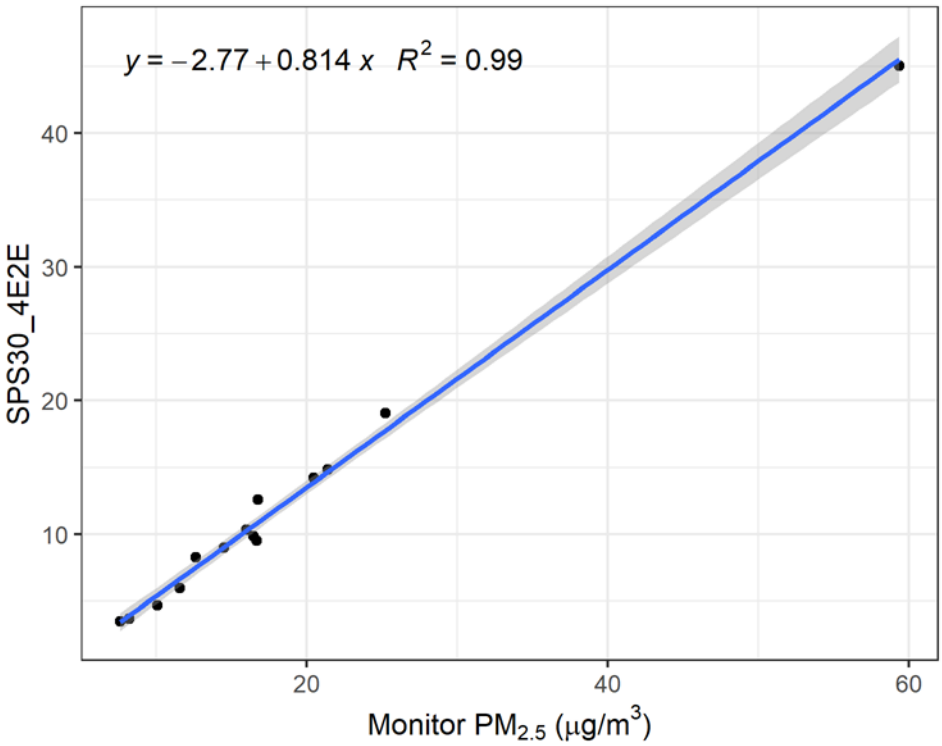


Ilustración 5-17 Correlación diaria sensor 3 SPS_30 4E2E con monitor de referencia, Estación Ráquira

Intercepto	Pendiente	Coeff
-2.767525	0.8139546	0.993828

iv. Error medio cuadrático diario

RMSE_dia	NRMSE_dia
5.457409	29.70873

e. Gráficos de variables atmosféricas

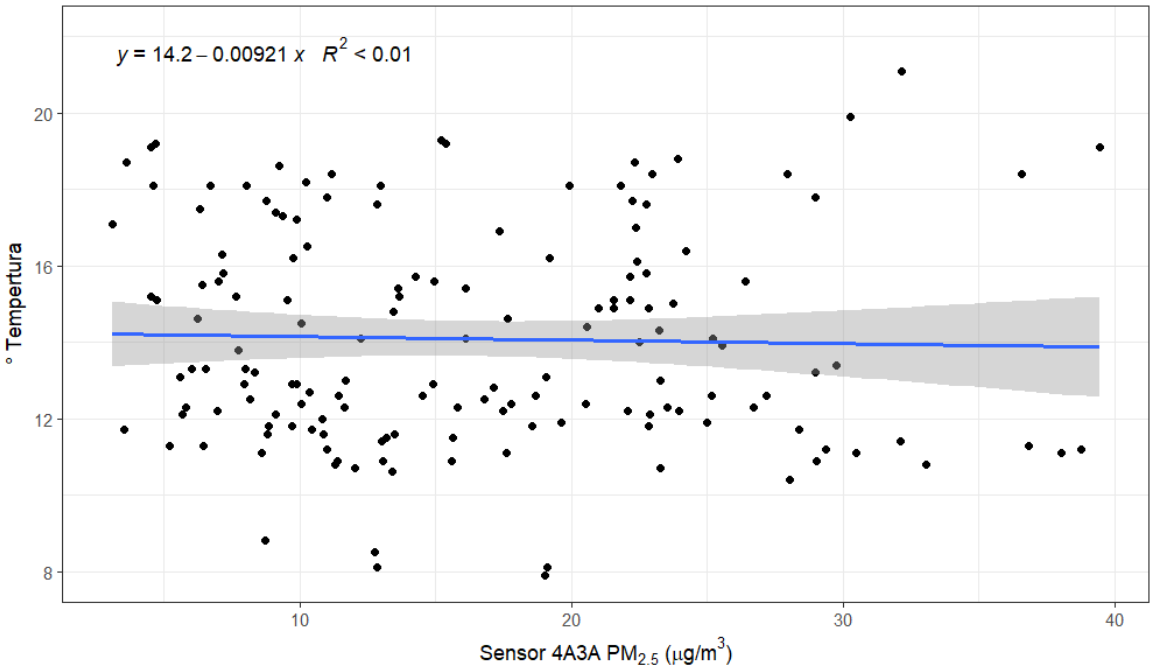


Ilustración 5-18 Correlación horaria sensor SPS30 4A3A con sensor de temperatura

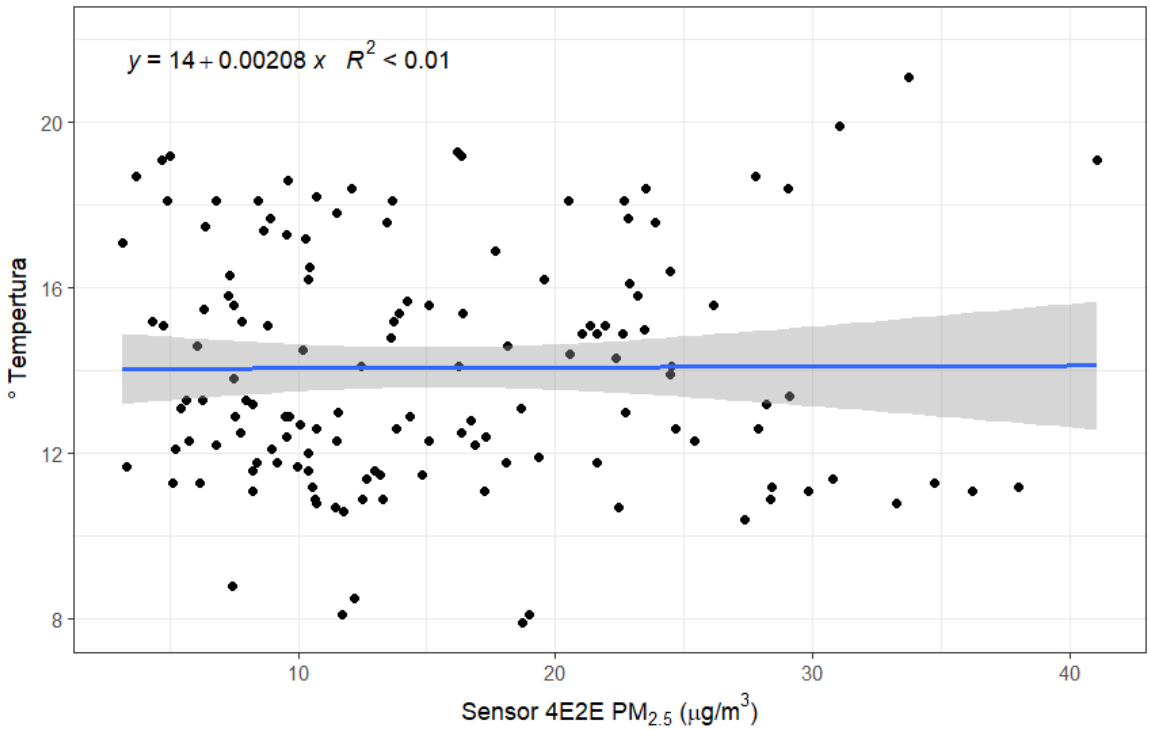


Ilustración 5-19 Correlación horaria sensor SPS30 4E2E con sensor de temperatura

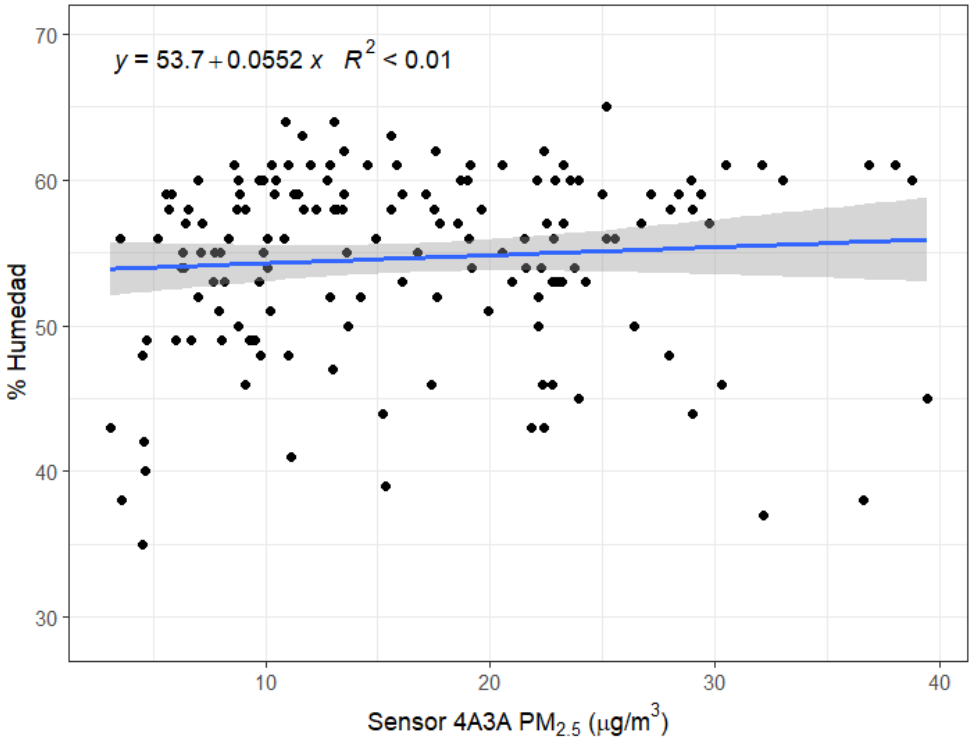


Ilustración 5-20 Correlación horaria sensor SPS30 4A3A con sensor de humedad

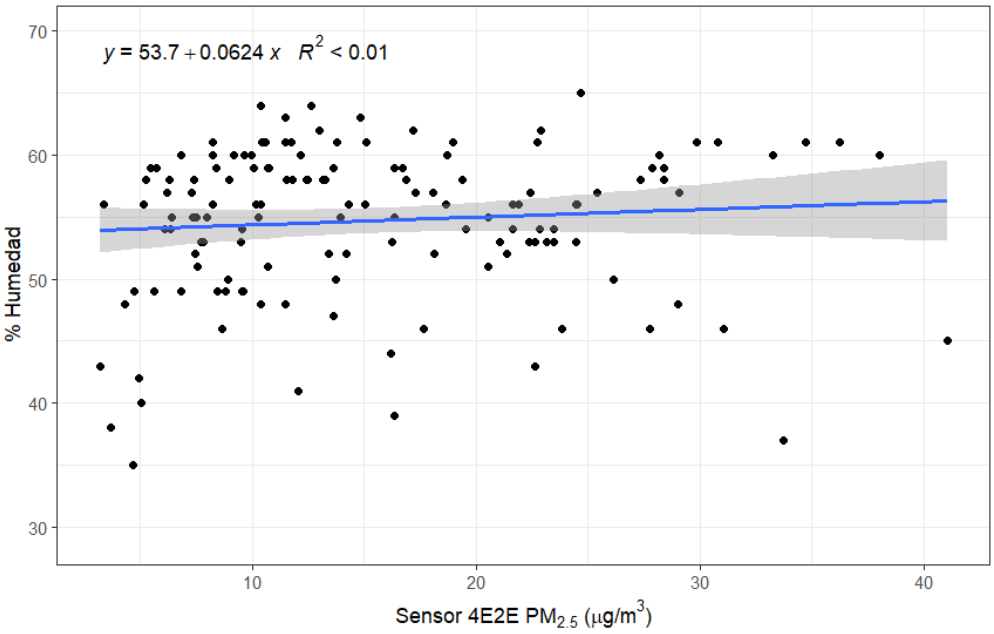


Ilustración 5-21 Correlación horaria sensor SPS30 4E2E con sensor de humedad

6. Anexo B: Perfiles verticales de material particulado

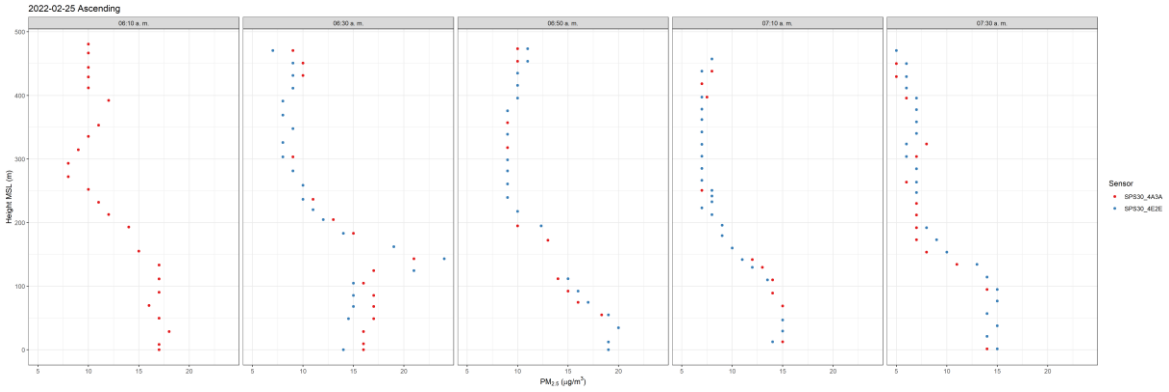


Ilustración 5-22 Perfiles verticales de calidad del aire, Municipio de Mosquera 25 de febrero de 2022

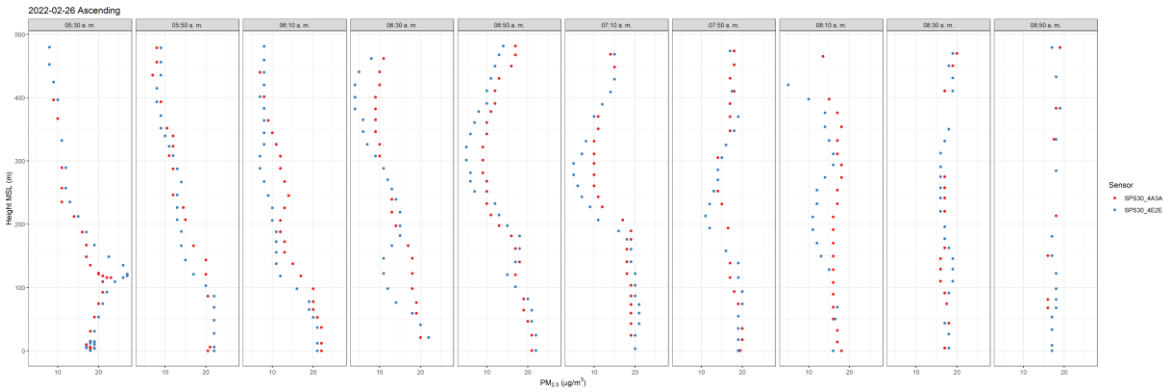


Ilustración 5-23 Perfiles verticales de calidad del aire, Municipio de Mosquera 26 de febrero de 2022

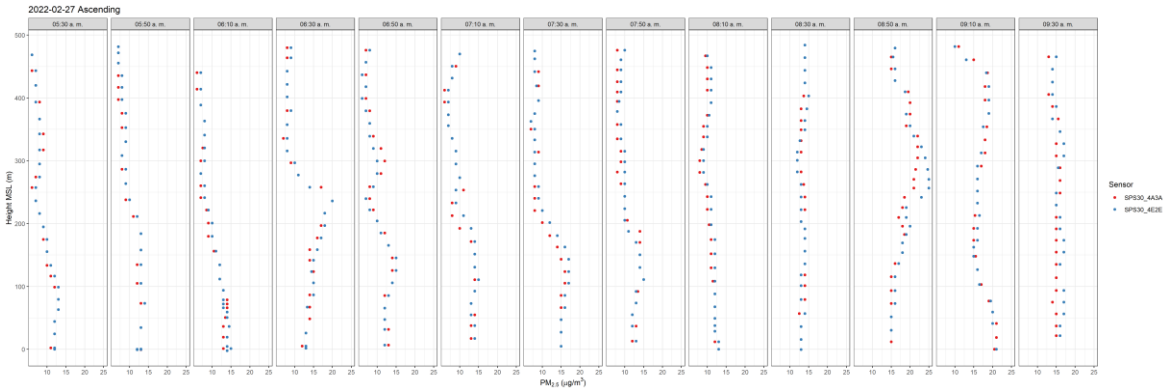


Ilustración 5-24 Perfiles verticales de calidad del aire, Municipio de Mosquera 27 de febrero de 2022

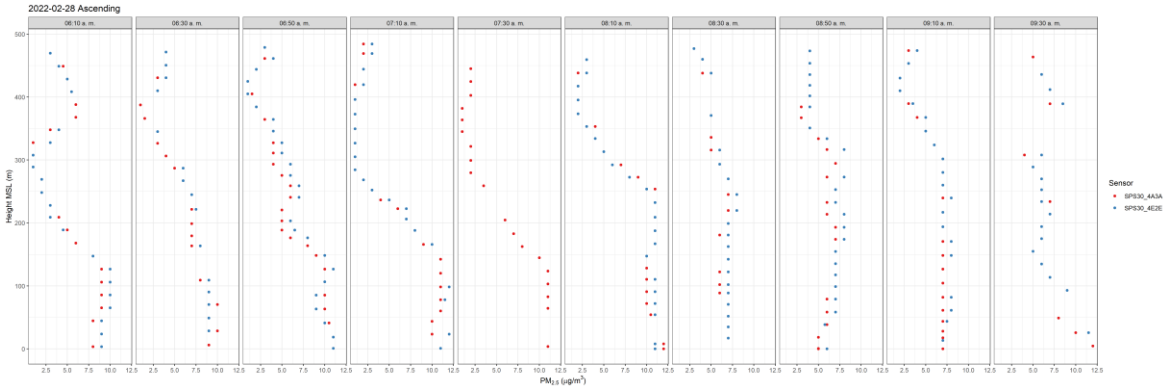


Ilustración 5-25 Perfiles verticales de calidad del aire, Municipio de Mosquera 28 de febrero de 2022

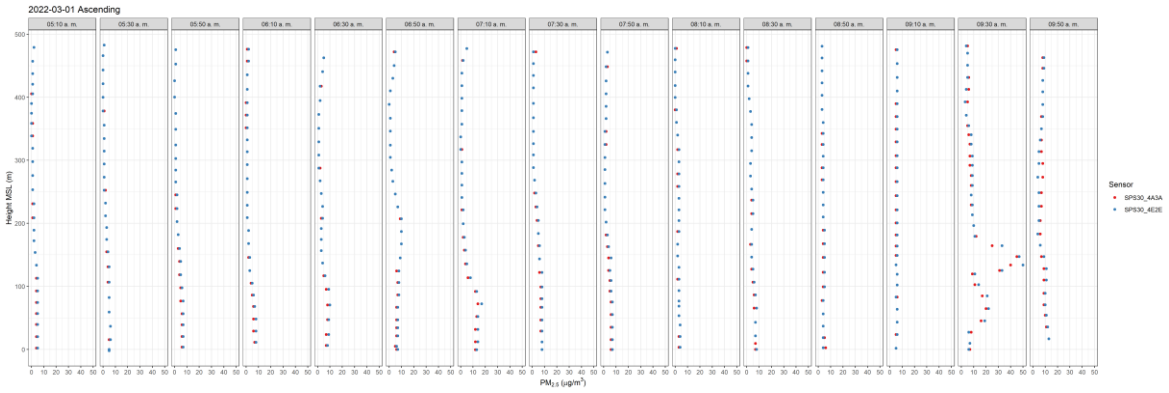


Ilustración 5-26 Perfiles verticales de calidad del aire, Municipio de Mosquera 1 de marzo de 2022

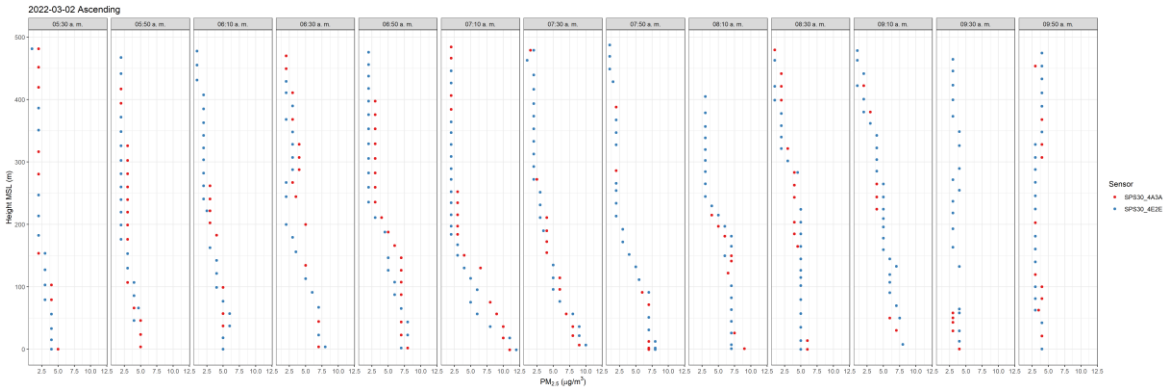


Ilustración 5-27 Perfiles verticales de calidad del aire, Municipio de Mosquera 2 de marzo de 2022

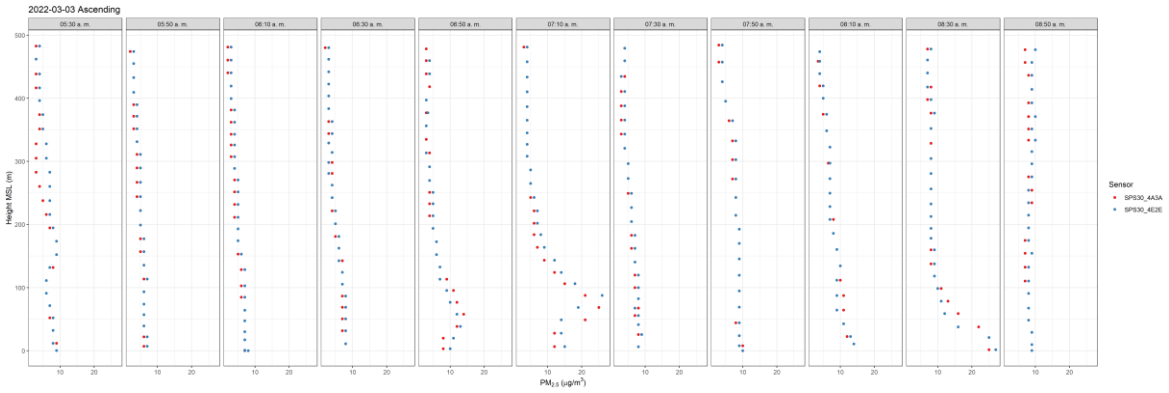


Ilustración 5-28 Perfiles verticales de calidad del aire, Municipio de Mosquera 3 de marzo de 2022

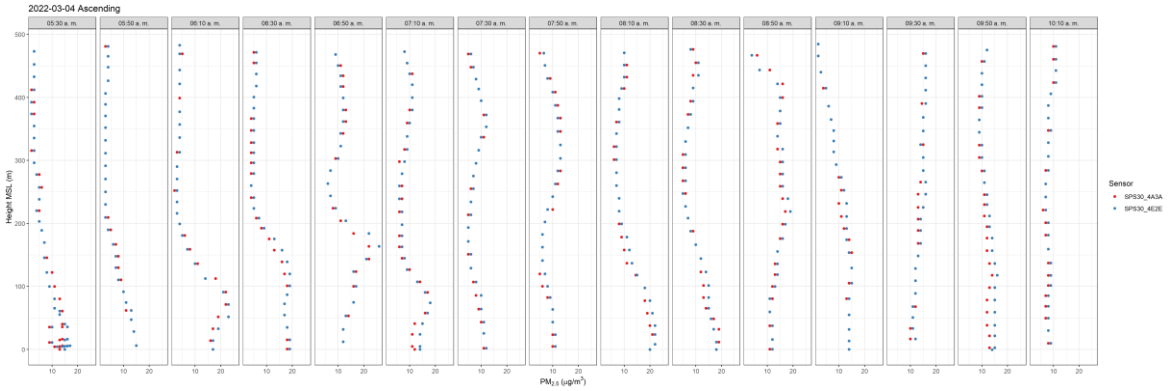


Ilustración 5-29 Perfiles verticales de calidad del aire, Municipio de Mosquera 4 de marzo de 2022