INFORME TÉCNICO N.° 01

Monitoreo indicativo de material particulado

PM_1, $PM_{2.5}$, PM_4, PM_{10} y PST.

Primera Campaña

08 al 24 de octubre de 2026
Pereira, Risaralda

Cliente: Corporación Autónoma Regional de Risaralda (CARDER)

Ejecutor: Sanambiente

	Elaboró	Revisó	Aprobó
Nombre	Mario Avila	Luis Olaya	Luis Olaya
Cargo	Profesional de Informes	Director Monitoreo	Director Monitoreo

Contenido

1. Resumen ejecutivo 4
2. Introducción 5
3. Objetivos 6
3.1 Objetivo general 6
3.2 Objetivos específicos 6
4. Marco de referencia 7
5. Metodología 8
5.1 Ubicación de las estaciones 8
5.2 Equipo de medición 8
5.3 Procesamiento de datos 9
5.4 Análisis estadístico 9
6. Resultados 10
6.1 Disponibilidad de datos 10
6.2 Condiciones meteorológicas 10
6.3 Material particulado $PM_{2.5}$ 11
6.4 Material particulado PM_{10} 12
6.5 Comparación con referencias internacionales 13
6.6 Variación temporal 15
6.7 Diferencias entre estaciones 17
6.8 Índice de Calidad del Aire 18
7. Parámetros sin nivel máximo permisible: PM_1, PM_4 y PST 19
7.1 Concentraciones 19
7.2 Distribución de la masa por tamaño 19
7.3 Relaciones entre fracciones 20
8. Conclusiones 21
9. Referencias 22
Anexo A. Registro fotográfico 24
Estación 1: Sede CARDER 24
Estación 2: Centro de Interpretación Ambiental 24

Lista de tablas

Tabla 1. Cifras clave de la campaña - µg/m³ 4
Tabla 2. Ubicación de las estaciones de monitoreo (WGS84) 8
Tabla 3. Características del equipo Met One ES-405. 9
Tabla 4. Disponibilidad de datos de material particulado 10
Tabla 5. Variables meteorológicas registradas (media y rango horario) 10
Tabla 6. Promedios diarios de $PM_{2.5}$ y PM_{10} - µg/m³ 11
Tabla 7. Máximo diario como porcentaje del valor de 24 horas de cada referencia 14
Tabla 8. Promedio por franja horaria - µg/m³ 17
Tabla 9. Comparación entre estaciones 18
Tabla 10. ICA diario por estación 18
Tabla 11. PM_1, PM_4 y PST: promedio y máximo diario - µg/m³ 19
Tabla 12. Relaciones entre fracciones 20

Lista de figuras

Figura 1. Matriz comparativa de niveles máximos permisibles y referenciales para material particulado (µg/m³) 7
Figura 2. Localización de las estaciones de monitoreo. 8
Figura 3. Temperatura y humedad relativa promedio diaria por estación 11
Figura 4. Variación diaria de $PM_{2.5}$ y PM_{10}. 12
Figura 5. Valores de $PM_{2.5}$ de cada referencia frente al máximo diario y a la media de la campaña. 13
Figura 6. Valores de PM_{10} de cada referencia frente al máximo diario y a la media de la campaña. 14
Figura 7. Perfil horario promedio de $PM_{2.5}$ y PM_{10} 16
Figura 8. Mapa de calor hora × día de $PM_{2.5}$ y PM_{10} 16
Figura 9. Concentración promedio por tipo de día 17
Figura 10. Distribución de la masa de PST por tamaño de partícula 19

1. Resumen ejecutivo

Entre el 8 y el 24 de octubre de 2026 se midió material particulado en la Sede CARDER (E1) y en el Centro de Interpretación Ambiental (E2) con un perfilador óptico Met One ES-405. Se obtuvieron 16 días representativos en E1 y 13 en E2.

Ningún promedio diario de $PM_{2.5}$ ni de PM_{10} superó los niveles máximos permisibles de la Resolución 2254 de 2017. A condiciones de referencia, los máximos fueron 9,2 y 32,6 µg/m³ en E1 y 7,2 y 36,4 µg/m³ en E2, es decir, como máximo el 25 % del límite de $PM_{2.5}$ y el 49 % del de PM_{10}. Tampoco se superaron los valores de 24 horas de la OMS, la Unión Europea, Estados Unidos, México, Chile y Perú, entre otros. El ICA arrojó una categoria de **Bueno** en todos los días representativos.

Además del cumplimiento, los datos muestran cuatro rasgos que orientan el seguimiento:

- **Las estaciones difieren en el tamaño de partícula.** E1 registró más $PM_{2.5}$ que E2 en los 13 días comparables, y E2 más PM_{10} en 12 de esos 13 días.
- **Predomina la fracción gruesa.** La relación $PM_{2.5}/PM_{10}$ fue 0,25 en E1 y 0,18 en E2.
- **El PM_{10} es mayor de noche.** El promedio nocturno superó al diurno en 29 % en E1 y en 41 % en E2, con el máximo hacia las 06:00 y el mínimo cerca del mediodía.

Tabla 1. Cifras clave de la campaña - µg/m³

Indicador	E1 Sede CARDER	E2 Centro de Interpretación Ambiental	Referencia de 24 h
$PM_{2.5}$, promedio de la campaña (cond. de referencia)	6,8	5,5	37 (Res. 2254/2017)
$PM_{2.5}$, máximo diario (cond. de referencia)	9,2	7,2	37 (Res. 2254/2017)
PM_{10}, promedio de la campaña (cond. de referencia)	26,7	31,1	75 (Res. 2254/2017)
PM_{10}, máximo diario (cond. de referencia)	32,6	36,4	75 (Res. 2254/2017)
Días por encima de algún valor de 24 h (11 referencias)	0	0	–
Relación $PM_{2.5}/PM_{10}$ (cociente de promedios)	0,25	0,18	–
Hora del máximo promedio de PM_{10}	06:00	06:00	–

2. Introducción

La Corporación Autónoma Regional de Risaralda (CARDER) realiza el seguimiento de la calidad del aire en su jurisdicción como parte de sus funciones de autoridad ambiental. En ese marco, Sanambiente llevó a cabo la primera campaña de monitoreo indicativo de material particulado en dos puntos: la sede de la Corporación (Estación 1, E1) y el Centro de Interpretación Ambiental (Estación 2, E2).

Las mediciones se hicieron entre el 8 y el 24 de octubre de 2026 con un perfilador óptico que registra de forma simultánea cinco fracciones de tamaño: PM_1, $PM_{2.5}$, PM_4, PM_{10} y partículas suspendidas totales (PST). El informe presenta los resultados y su comparación con la Resolución 2254 de 2017 y con referencias internacionales, y analiza cómo varían las concentraciones en el tiempo, en qué se diferencian las estaciones y qué tamaños de partícula predominan.

Al tratarse de un monitoreo indicativo, los resultados sirven para conocer el orden de magnitud de las concentraciones y su comportamiento en el tiempo. No reemplazan una verificación formal de cumplimiento normativo.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Determinar, de manera indicativa, las concentraciones de material particulado en las estaciones Sede CARDER y Centro de Interpretación Ambiental durante la primera campaña de monitoreo.

3.2 Objetivos específicos

- Calcular los promedios de 24 horas de $PM_{2.5}$ y PM_{10} y compararlos con los niveles máximos permisibles de la Resolución 2254 de 2017.
- Contrastar los resultados con las guías de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2021) y con las normas de la Unión Europea, Estados Unidos, México, Chile y Perú, entre otros.
- Calcular el Índice de Calidad del Aire (ICA) diario para $PM_{2.5}$ y PM_{10}.
- Describir la variación temporal de las concentraciones y las diferencias entre estaciones.
- Describir el comportamiento de PM_1, PM_4 y PST y la distribución de la masa por tamaño de partícula.

4. Marco de referencia

La norma aplicable es la Resolución 2254 de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Sus niveles máximos permisibles están expresados a condiciones de referencia (25 C y 760 mmHg) y se evalúan en cada punto de monitoreo por separado (artículo 2, parágrafo 2).

Para dar contexto técnico, los resultados se comparan también con las guías de calidad del aire de la OMS (2021), incluidas sus metas interinas, y con las normas de la Unión Europea, Estados Unidos, México, Chile y Perú, a condiciones ambiente. La **Figura 1** reúne los valores de 24 horas y anuales de cada referencia, verificados en sus fuentes oficiales. El tono de cada celda indica cuántas veces el valor supera el nivel guía de la OMS, y el triángulo marca los valores que la campaña supera, todos ellos promedios anuales, que no aplican a una campaña de 17 días.

Matriz comparativa de niveles máximos permisibles y referenciales para material particulado

Concentraciones en µg/m³. El tono indica cuántas veces el valor supera el nivel guía de la OMS 2021. ▲ = campaña por encima del valor (indicativo; los anuales no aplican a 17 días).

	PM2.5 24 h	PM2.5 anual	PM10 24 h	PM10 anual	PM1	PM4	PST 24 h / anual
COLOMBIA							
Colombia · Res. 2254/2017	37	25 (→15)	75	50 (→30)	—	—	300 / 100*
ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD							
OMS 2021 · nivel guía	15	5 ▲	45	15 ▲	—	—	—
OMS · meta interina 4	25	10	50	20 ▲	—	—	—
OMS · meta interina 3	37,5	15	75	30	—	—	—
OMS · meta interina 2	50	25	100	50	—	—	—
OMS · meta interina 1	75	35	150	70	—	—	—
AMÉRICA							
EE. UU. · NAAQS (US EPA)	35	9	150	sin valor	—	—	—
México · NOM-025-SSA1-2021 (etapa final)	25	10	50	20 ▲	—	—	—
Chile · DS 12/2011 y DS 12/2021	50	20	130	50	—	—	—
Perú · DS 003-2017-MINAM	50	25	100	50	—	—	—
EUROPA							
Unión Europea · Dir. (UE) 2024/2881 (2030)	25	10	45	20 ▲	—	—	—

Veces el nivel guía OMS 2021 de cada columna: ≤1× | 1–2× | 2–3,5× | 3,5–5× | 5–8×

PM1 y PM4: ninguna de las normas revisadas fija niveles; el PM4 corresponde a la convención de muestreo de la fracción respirable en higiene ocupacional (ISO 7708:1995; EN 481).
* PST: Res. 610/2010, derogada por la Res. 2254/2017; referencia histórica. Colombia: entre paréntesis, valor anual desde 2030; comparación a condiciones de referencia (25 °C; 760 mmHg).
Formas estadísticas distintas (percentil 98 o 99, superaciones al año, promedio de tres años); se compara el valor numérico. México: etapa final de la NOM-025 (cumplimiento gradual).
Chile: nueva norma de PM2.5 (38 / 15) aprobada en diciembre de 2025, pendiente de publicación. EE. UU.: sin valor anual de PM10. Valores verificados en las fuentes oficiales en noviembre de 2026.

Figura 1. Matriz comparativa de niveles máximos permisibles y referenciales para material particulado (µg/m³)

Ninguna de las normas revisadas fija niveles para PM_1 ni PM_4. El PM_4 corresponde a la convención de muestreo de la fracción respirable usada en higiene ocupacional (ISO 7708:1995; EN 481), no a un estándar de aire ambiente. El PST dejó de estar regulado en Colombia con la derogatoria de la Resolución 610 de 2010, que fijaba 300 µg/m³ en 24 horas; ese valor se usa solo como referencia histórica.

5. Metodología

5.1 Ubicación de las estaciones

La **Tabla 2** presenta las coordenadas de las estaciones y la **Figura 2** su localización.

Tabla 2. Ubicación de las estaciones de monitoreo (WGS84)

Estación	Nombre	Latitud	Longitud
E1	Sede CARDER	4,807231°	-75,719231°
E2	Centro de Interpretación Ambiental	4,804278°	-75,666250°

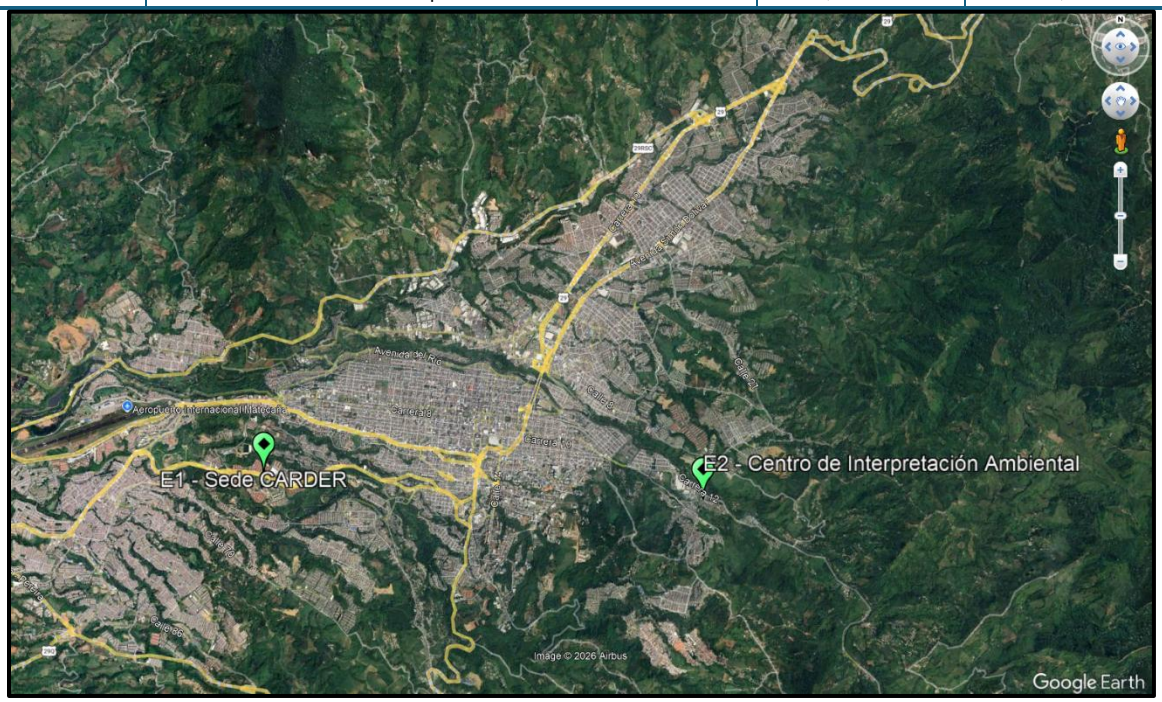


Figura 2. Localización de las estaciones de monitoreo.

5.2 Equipo de medición

Se utilizó un perfilador de partículas Met One Instruments ES-405. El equipo mide por dispersión de luz en ángulo recto con un diodo láser y reporta cinco canales de masa de forma simultánea. Tiene un calentador en la entrada para reducir el error por humedad y un flujo de aire de envoltura que evita que las partículas contaminen la óptica. El fabricante lo presenta como un sensor cercano a referencia, con calibración trazable a patrones NIST. En este informe sus resultados se tratan como indicativos, de acuerdo con el alcance de la campaña. La **Tabla 3** resume sus características.

Tabla 3. Características del equipo Met One ES-405.

Característica	Especificación
Principio de medición	Dispersión de luz en ángulo recto, fuente láser
Fracciones	PM_1, $PM_{2.5}$, PM_4, PM_{10} y PST (PST indicativo según el fabricante)
Resolución	0,1 µg/m³
Rango de medición	PM_1: 300 µg/m³; $PM_{2.5}$: 2.000 µg/m³; PM_4: 4.000 µg/m³; PM_{10} y PST: 10.000 µg/m³
Caudal	1,0 L/min de muestra y 1,0 L/min de aire de envoltura, con control volumétrico activo
Condiciones de operación	0 a 50 °C; humedad relativa de 0 a 95 % sin condensación
Intervalo de registro usado	60 minutos

5.3 Procesamiento de datos

Se trabajó con promedios horarios. Un día se consideró representativo cuando contó con al menos 18 datos horarios válidos (75 %). Los días que no cumplen este criterio se reportan, pero no se comparan con los niveles de 24 horas.

Las concentraciones medidas a condiciones ambiente se convirtieron a condiciones de referencia, hora por hora, con la siguiente expresión:

$$C_{ref} = C_{amb} \times (760 / P) \times ((T + 273{,}15) / 298{,}15)$$

donde P es la presión atmosférica (mmHg) y T la temperatura (°C) registradas en la estación. En las horas sin dato de temperatura o presión se aplicó el factor calculado con los valores medios de la estación. La conversión aumenta las concentraciones entre 15 % y 19 %.

La comparación con la Resolución 2254 de 2017 y el cálculo del ICA se hicieron con valores a condiciones de referencia. Para las demás referencias y para el análisis descriptivo se usaron valores a condiciones ambiente. El ICA se obtuvo con la ecuación del artículo 21 de la Resolución 2254 de 2017 y los puntos de corte de su Tabla 6.

5.4 Análisis estadístico

Para describir la variación temporal se separaron las horas en día (06:00 a 17:59) y noche (18:00 a 05:59), y los días en hábiles, fines de semana y festivo (lunes 12 de octubre). El perfil horario se acompaña de un intervalo de confianza del 95 % obtenido por remuestreo (2.000 repeticiones) sobre los días con dato en cada hora.

6. Resultados

6.1 Disponibilidad de datos

Tabla 4. Disponibilidad de datos de material particulado

Estación	Datos horarios válidos de PM	% de 408 h	Días con datos	Días representativos	Días no representativos
E1 Sede CARDER	396	97,1 %	17	16	08/10 (12 h)
E2 Centro de Interpretación Ambiental	344	84,3 %	16	13	09/10 (11 h), 12/10 (11 h), 13/10 (10 h)

En E1 el registro empezó el 8 de octubre a las 12:00, por lo que ese día no alcanzó el 75 % de datos; el resto de la campaña tuvo cobertura completa. En E2 el registro comenzó el 9 de octubre a las 13:00 y hubo interrupciones los días 12 y 13 de octubre. E2 tiene 344 horas con dato de material particulado y 334 con dato de temperatura, humedad y presión; en las horas sin dato meteorológico se aplicó el factor medio descrito en el numeral 5.3.

6.2 Condiciones meteorológicas

Tabla 5. Variables meteorológicas registradas (media y rango horario)

Variable	E1 Sede CARDER	E2 Centro de Interpretación Ambiental
Temperatura (°C)	24,6 (19,3 a 35,3)	20,3 (15,1 a 31,0)
Humedad relativa (%)	76,2 (43 a 92)	87,6 (49 a 100)
Presión (mmHg)	648,6 (644,3 a 651,7)	644,6 (640,8 a 647,1)

E2 fue en promedio 4,3°C más fría y unos 11 puntos porcentuales más húmeda que E1, y su presión media fue 4 mmHg menor, lo que corresponde a una ubicación unos 50 m más alta.

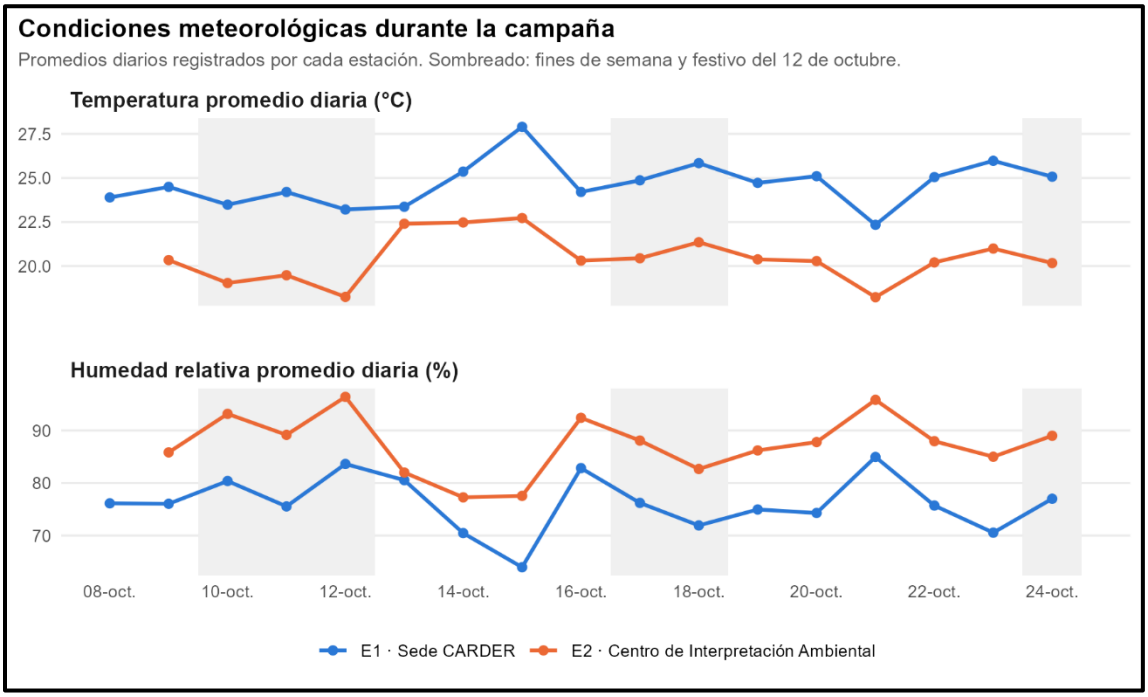


Figura 3. Temperatura y humedad relativa promedio diaria por estación

6.3 Material particulado $PM_{2.5}$

En E1 los promedios diarios de $PM_{2.5}$ a condiciones de referencia estuvieron entre 3,6 y 9,2 µg/m³, con una media de 6,8 µg/m³ en los 16 días representativos. En E2 variaron entre 3,9 y 7,2 µg/m³, con una media de 5,5 µg/m³. El valor más alto (9,2 µg/m³, E1, 20 de octubre) equivale al 25 % del nivel máximo permisible de 24 horas (37 µg/m³). No hubo excedencias (ver **Tabla 6** y **Figura 4**).

Tabla 6. Promedios diarios de $PM_{2.5}$ y PM_{10} - µg/m³

Fecha	$PM_{2.5}$ E1	$PM_{2.5}$ E2	PM_{10} E1	PM_{10} E2
08/10/2026	6,8*	–	25,7*	–
09/10/2026	8,6	5,5*	31,4	24,3*
10/10/2026	7,6	7,2	27,4	31,8
11/10/2026	5,1	4,1	21,9	24,3
12/10/2026	4,4	3,7*	20,6	33,3*
13/10/2026	3,6	3,1*	14,6	26,3*
14/10/2026	5,6	4,3	28,5	33,8
15/10/2026	6,7	5,4	28,3	29,9
16/10/2026	8,2	6,7	27,8	34,4
17/10/2026	7,4	5,9	32,6	36,4
18/10/2026	4,7	3,9	23,2	28,1
19/10/2026	8,0	5,8	31,9	31,5
20/10/2026	9,2	6,7	30,2	35,0

Fecha	$PM_{2.5}$ E1	$PM_{2.5}$ E2	PM_{10} E1	PM_{10} E2
21/10/2026	7,2	4,5	23,5	27,9
22/10/2026	7,2	4,7	29,6	30,4
23/10/2026	6,6	5,3	26,7	28,5
24/10/2026	8,2	6,7	29,6	31,7
Promedio (días repr.)	**6,8**	**5,5**	**26,7**	**31,1**
Máximo diario	**9,2**	**7,2**	**32,6**	**36,4**
Máximo / límite 24 h	**25 %**	**19 %**	**43 %**	**49 %**
Límite 24 h Res. 2254/2017	**37**	**37**	**75**	**75**
Excedencias	**0**	**0**	**0**	**0**

** Día no representativo (menos de 18 horas con dato); se reporta como referencia y no se compara con el nivel de 24 horas. –: sin datos.*

6.4 Material particulado PM_{10}

Los promedios diarios de PM_{10} estuvieron entre 14,6 y 32,6 µg/m³ en E1 (media de 26,7 µg/m³) y entre 24,3 y 36,4 µg/m³ en E2 (media de 31,1 µg/m³). El máximo de las dos estaciones se presentó el 17 de octubre; el de E2 (36,4 µg/m³) corresponde al 49 % del nivel de 24 horas (75 µg/m³). No se presentaron excedencias (ver **Tabla 6** y **Figura 4**).

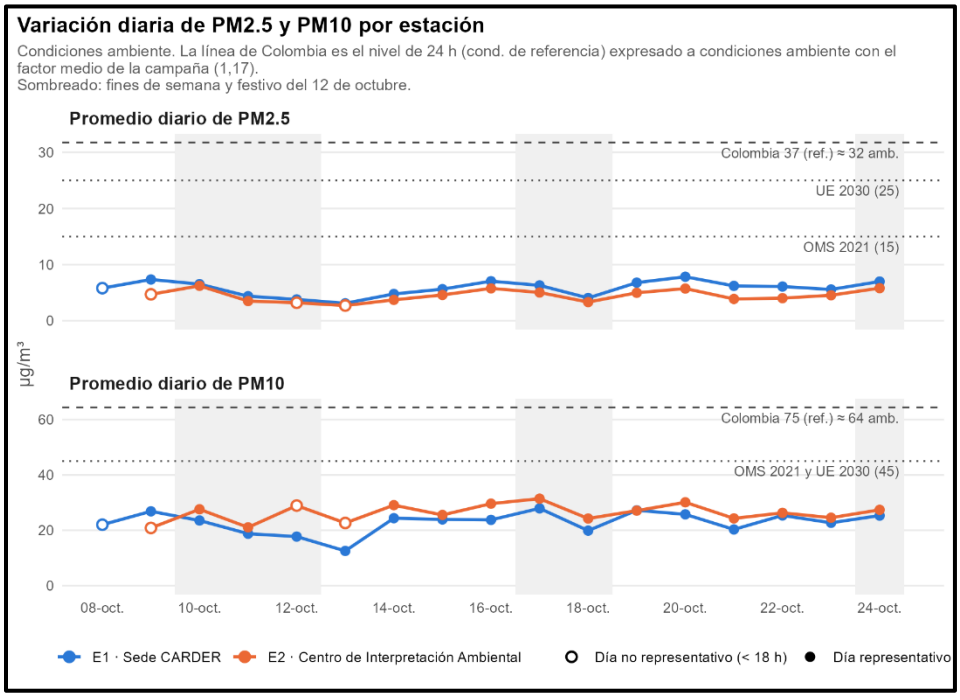


Figura 4. Variación diaria de $PM_{2.5}$ y PM_{10}.
Sombreado: fines de semana y festivo; marcadores huecos: días no representativos

6.5 Comparación con referencias internacionales

Ningún promedio diario superó el valor de 24 horas de las referencias de la **Figura 1**, ni siquiera el más exigente, la guía de la OMS (15 µg/m³ para $PM_{2.5}$ y 45µg/m³ para PM_{10}). A condiciones ambiente, el máximo diario de $PM_{2.5}$ fue 7,8 µg/m³ en E1 (52 % de la guía de la OMS) y 6,2 µg/m³ en E2 (41 %). El de PM_{10} fue 27,9 µg/m³ en E1 (62 %) y 31,4 µg/m³ en E2 (70 %).La conclusión no cambia si se usan los valores a condiciones de referencia (ver **Figura 5** y **Figura 6**; **Tabla 7**).

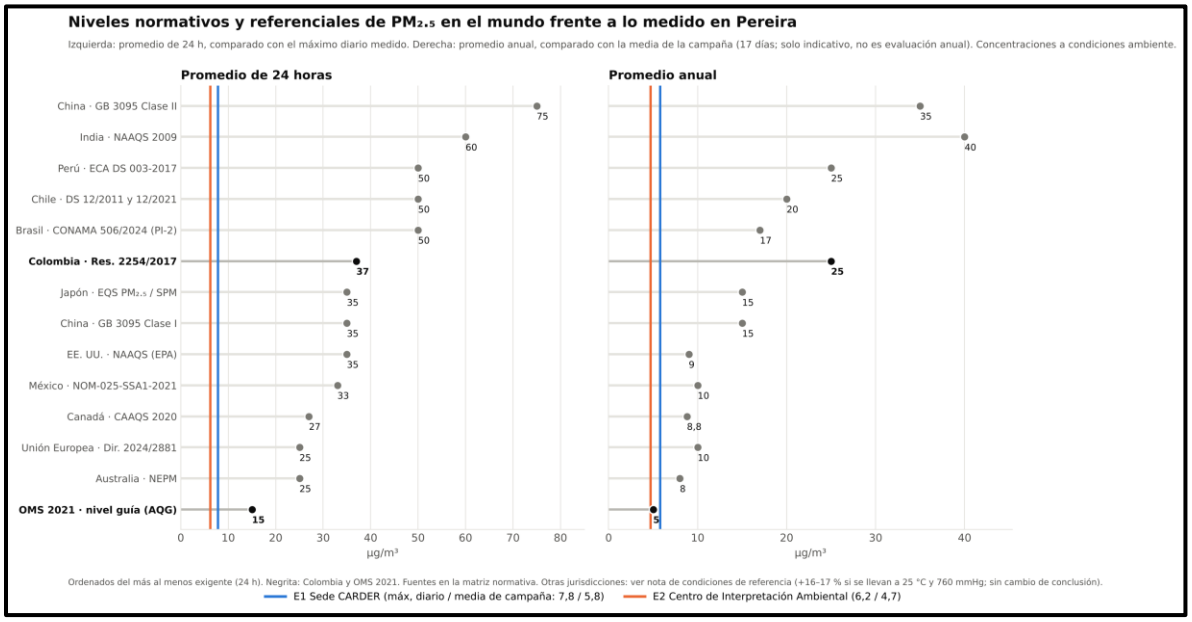


Figura 5. Valores de $PM_{2.5}$ de cada referencia frente al máximo diario y a la media de la campaña.

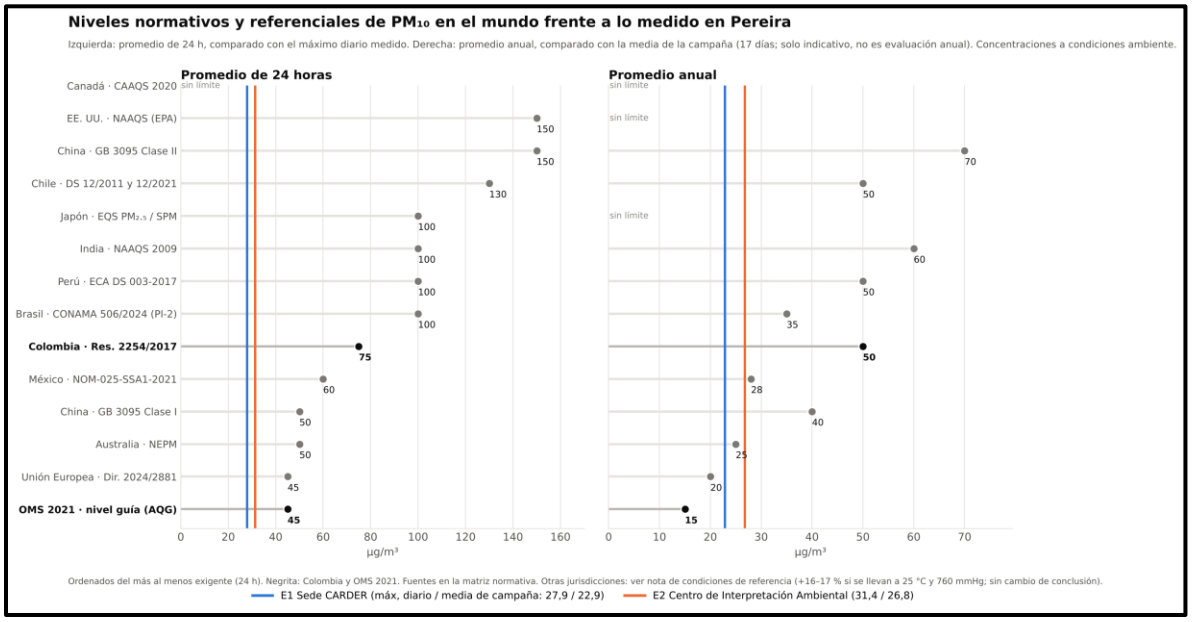


Figura 6. Valores de PM_{10} de cada referencia frente al máximo diario y a la media de la campaña.

Tabla 7. Máximo diario como porcentaje del valor de 24 horas de cada referencia

Referencia	$PM_{2.5}$ 24 h	$PM_{2.5}$ anual	PM_{10} 24 h	PM_{10} anual	Fuente
Colombia · Res. 2254/2017	37	25 (15 desde 2030)	75	50 (30 desde 2030)	MADS (2017)
OMS 2021 · nivel guía	15	5	45	15	WHO (2021)
OMS · meta interina 4	25	10	50	20	WHO (2021)
OMS · meta interina 3	37,5	15	75	30	WHO (2021)
OMS · meta interina 2	50	25	100	50	WHO (2021)
OMS · meta interina 1	75	35	150	70	WHO (2021)
Unión Europea · Dir. 2024/2881 (desde 2030)	25	10	45	20	UE (2024)
EE. UU. · NAAQS	35	9	150	—	US EPA (2024)
Canadá · CAAQS 2020	27	8,8	—	—	CCME (2025)
México · NOM-025-SSA1-2021	33	10	60	28	Sec. de Salud (2021)
Chile · DS 12/2011 y DS 12/2021	50	20	130	50	MMA Chile
Perú · ECA DS 003-2017-MINAM	50	25	100	50	MINAM (2017)
Brasil · CONAMA 506/2024 (PI-2)	50	17	100	35	CONAMA (2024)
India · NAAQS 2009	60	40	100	60	CPCB (2009)
China · GB 3095-2012 Clase I	35	15	50	40	MEP/AQSIQ (2012)
China · GB 3095-2012 Clase II	75	35	150	70	MEP/AQSIQ (2012)
Japón · EQS $PM_{2.5}$ y SPM	35	15	100 (SPM)	—	MOE Japón (2009)
Australia · NEPM	25	8	50	25	NEPC (2021)

Colombia: máximos a condiciones de referencia; demás referencias: a condiciones ambiente.

Los niveles anuales no aplican a una campaña de 17 días; los paneles de la derecha de las Figuras 5 y 6 se presentan solo como indicación. Los promedios de la campaña están por debajo de los niveles anuales vigentes en Colombia. El promedio de PM_{10} de E2 a condiciones de referencia (31,1 µg/m³) es similar al nivel anual que regirá desde 2030 (30 µg/m³). A condiciones ambiente, los promedios de PM_{10} de ambas estaciones (22,9 y 26,8 µg/m³) superan la guía anual de la OMS (15 µg/m³), la meta interina 4 de la OMS y los valores anuales de la UE y de la etapa final de México (20 µg/m³). En $PM_{2.5}$, E1 (5,8 µg/m³) queda ligeramente por encima de la guía anual de la OMS (5 µg/m³). Estas observaciones justifican continuar el seguimiento para establecer si el comportamiento se mantiene durante el año.

6.6 Variación temporal

Variación diaria

Los promedios diarios de las dos estaciones variaron de forma parecida (**Figura 4**). La correlación entre los datos horarios de ambas fue 0,60 para $PM_{2.5}$ y 0,72 para PM_{10} (344 horas comparadas), lo que indica que responden en buena parte a las mismas condiciones atmosféricas. Los valores más bajos se registraron entre el 11 y el 13 de octubre.

Ciclo diurno

El PM_{10} sigue un ciclo marcado (**Figura 7**). En E1 alcanza su máximo a las 06:00 (31,9 µg/m³), se mantiene alto entre las 19:00 y las 23:00 y baja a 14,3 µg/m³ a las 13:00. En E2 el nivel nocturno es casi constante entre las 18:00 y las 06:00 (29 a 33 µg/m³) y baja a 16,7 µg/m³ a las 12:00. El $PM_{2.5}$ tiene picos en las horas de mayor movilidad: en E1 a las 08:00 (8,0 µg/m³) y entre las 18:00 y las 21:00; en E2 a las 18:00 (7,5 µg/m³).

Este patrón es frecuente en valles andinos y se asocia sobre todo a la altura de la capa de mezcla, que es baja y estable en la noche y la madrugada y alcanza su mayor desarrollo al mediodía. El máximo de PM_{10} a las 06:00, antes del pico de tráfico de la mañana, sugiere que la acumulación nocturna pesa más que la emisión de esa hora. Las bandas de confianza muestran que la diferencia entre la noche y el mediodía es mayor que la incertidumbre del promedio en ambas estaciones.

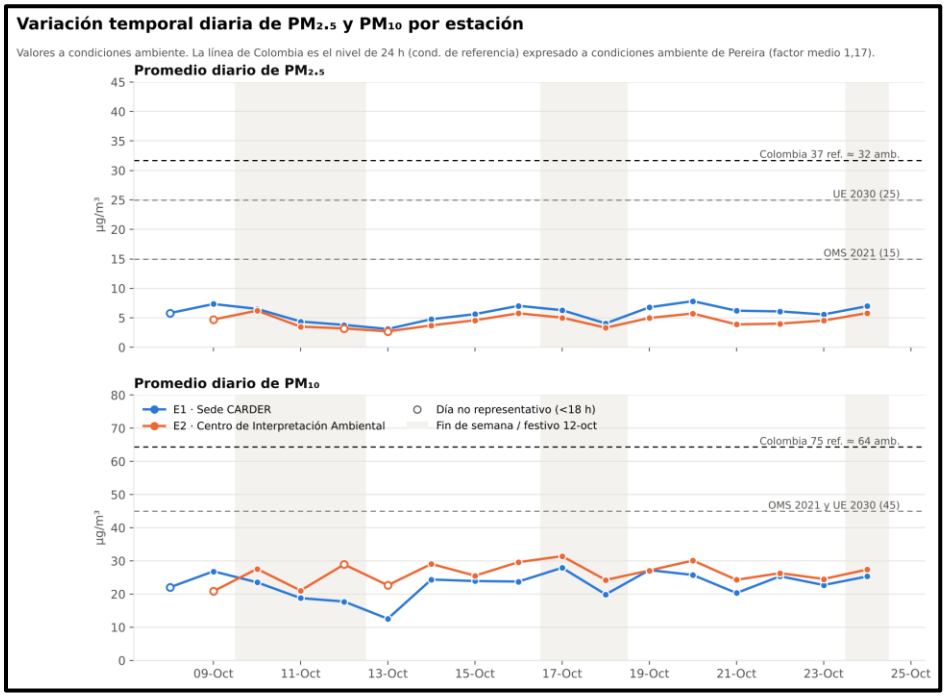


Figura 7. Perfil horario promedio de $PM_{2.5}$ y PM_{10}

El mapa de calor (**Figura 8**) muestra cada hora de la campaña. El patrón nocturno de PM_{10} se repite casi todos los días en E2 y de forma más corta en E1. También se observan los vacíos de datos de E2 y los días de menor concentración.

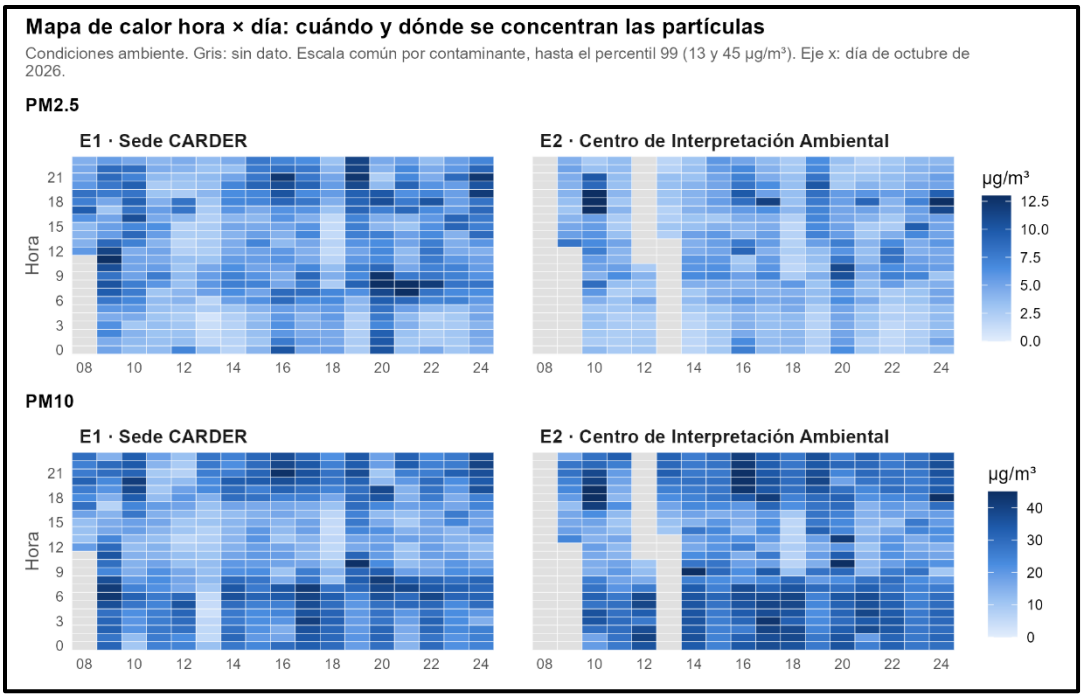


Figura 8. Mapa de calor hora × día de $PM_{2.5}$ y PM_{10}

Tabla 8. Promedio por franja horaria - µg/m³

Estación y fracción	Día (06–18 h)	Noche (18–06 h)	Diferencia	Cociente noche/día
E1, PM2.5	6,0	5,5	-0,5	0,91
E1, PM10	20,0	25,7	5,7	1,29
E2, PM2.5	4,9	4,3	-0,7	0,87
E2, PM10	22,0	31,0	8,9	1,41

Días hábiles, fines de semana y festivo

En E1 el festivo del lunes 12 de octubre tuvo las concentraciones más bajas: 3,8 µg/m³ de $PM_{2.5}$ y 17,7 µg/m³ de PM_{10}, frente a 6,0 y 23,2 µg/m³ en días hábiles. En E2 no se observó esa reducción en PM_{10} (28,9 frente a 26,5 µg/m³), aunque ese día solo tuvo 11 horas con dato. Los fines de semana tuvieron valores similares a los días hábiles en las dos estaciones (**Figura 9**). Por ser un solo festivo, el resultado de E1 se presenta como un indicio de influencia del tráfico, no como una demostración: ese día pudo coincidir con otras condiciones, como lluvia, que no se registraron.

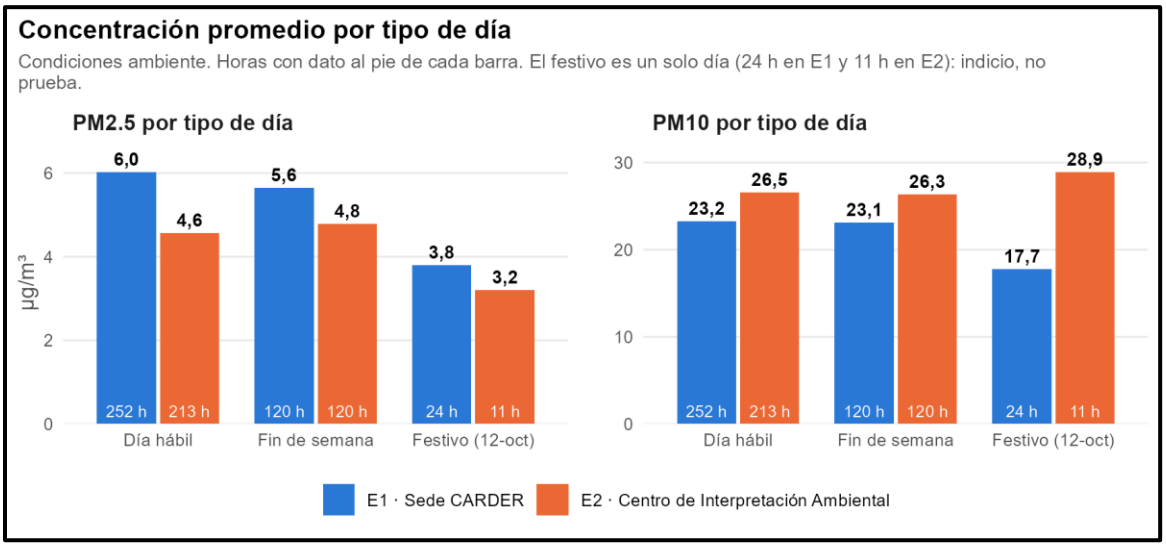


Figura 9. Concentración promedio por tipo de día

6.7 Diferencias entre estaciones

La **Tabla 9** compara los promedios diarios de los 13 días representativos en ambas estaciones. E1 fue mayor en las fracciones finas (PM_1, $PM_{2.5}$ y PM_4) todos los días, y E2 fue mayor en las gruesas (PM_{10} y PST) en 12 de los 13 días.

Tabla 9. Comparación entre estaciones

Fracción	Días con E1 > E2	Días con E2 > E1	Mediana E1 − E2 (µg/m³)	Valor p (Wilcoxon)
PM1	13	0	1,24	< 0,001
PM2.5	13	0	1,18	0,002
PM4	13	0	0,88	< 0,001
PM10	1	12	-3,50	< 0,001
PST	1	12	-3,71	0,003

Un valor negativo de la mediana indica que E2 fue mayor.

La diferencia cambia de signo entre PM_4 y PM_{10}: E2 tiene más partículas de entre 4 y 10 µm, mientras que E1 tiene más partículas finas. Las estaciones no se diferencian solo en la concentración sino en el tamaño de las partículas que predominan.

6.8 Índice de Calidad del Aire

Todos los días representativos quedaron en la categoría Buena (ICA de 0 a 50) para los dos contaminantes (**Tabla 10**). Según la Resolución 2254 de 2017, esta categoría corresponde a un riesgo bajo para la salud.

Tabla 10. ICA diario por estación

Fecha	E1 ICA $PM_{2.5}$	E1 ICA PM_{10}	E2 ICA $PM_{2.5}$	E2 ICA PM_{10}
08/10/2026	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.
09/10/2026	38	29	N.R.	N.R.
10/10/2026	33	25	29	30
11/10/2026	21	20	17	22
12/10/2026	17	19	N.R.	N.R.
13/10/2026	17	14	N.R.	N.R.
14/10/2026	25	26	17	31
15/10/2026	29	26	21	28
16/10/2026	33	26	29	31
17/10/2026	29	31	25	33
18/10/2026	21	21	17	26
19/10/2026	33	30	25	29
20/10/2026	38	28	29	32
21/10/2026	29	22	17	26
22/10/2026	29	28	21	28
23/10/2026	29	25	21	27
24/10/2026	33	28	29	30

Todos los valores numéricos corresponden a la categoría Buena (0 a 50). N.R.: día no representativo.

7. Parámetros sin nivel máximo permisible: PM_1, PM_4 y PST

La Resolución 2254 de 2017 no establece niveles para PM_1 ni PM_4, y tampoco las demás normas revisadas. El PST dejó de estar regulado en Colombia con la derogatoria de la Resolución 610 de 2010. Por esta razón estas fracciones se presentan en un capítulo aparte y con fines descriptivos.

7.1 Concentraciones

Tabla 11. PM_1, PM_4 y PST: promedio y máximo diario - µg/m³

Parámetro	E1 promedio	E1 máximo diario	E2 promedio	E2 máximo diario
PM_1 (cond. ambiente)	4,5	6,4	3,4	5,0
PM_4 (cond. ambiente)	9,1	11,3	8,5	9,8
PST (cond. ambiente)	29,0	36,9	33,2	40,7
PST (cond. de referencia)	33,9	43,2	38,6	47,3

El PM_1 fue mayor en E1 (4,5 µg/m³ en promedio) que en E2 (3,4 µg/m³), igual que el $PM_{2.5}$. El PM_4 tuvo valores parecidos en las dos estaciones. En PST, el máximo diario a condiciones de referencia (47,3 µg/m³, E2) equivale al 16 % del valor de 300 µg/m³ que fijaba la Resolución 610 de 2010.

7.2 Distribución de la masa por tamaño

La masa de partículas mayores de 2,5 µm representó el 80 % del PST en E1 y el 86 % en E2, y fue mayor de noche (77 % de día y 82 % de noche en E1; 83 % y 88 % en E2). El rango de 4 a 10 µm es el de mayor aporte: 48 % en E1 y 55 % en E2, con 60 % en la noche de E2 (**Figura 11**).

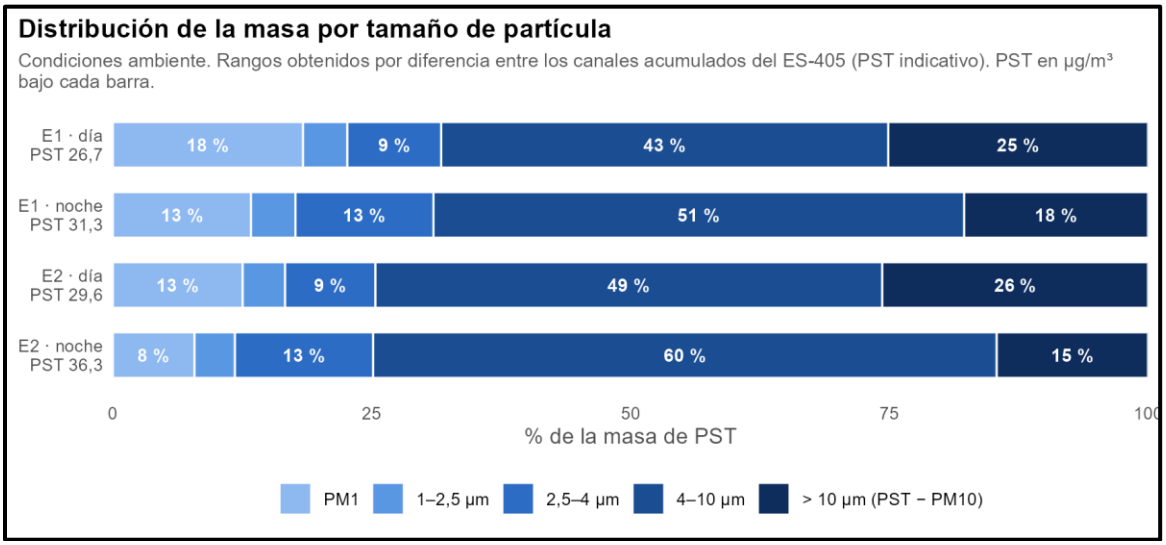


Figura 10. Distribución de la masa de PST por tamaño de partícula

7.3 Relaciones entre fracciones

Tabla 12. Relaciones entre fracciones

Relación	E1 cociente de promedios	E1 promedio de cocientes diarios	E2 cociente de promedios	E2 promedio de cocientes diarios
$PM_1/PM_{2.5}$	0,79	0,78	0,72	0,71
$PM_{2.5}/PM_{10}$	0,25	0,25	0,18	0,18
PM_4/PM_{10}	0,40	0,40	0,32	0,32
PM_{10}/PST	0,79	0,79	0,81	0,81
$PM_{2.5}/PM_{10}$ de día / de noche	0,30 / 0,21	–	0,22 / 0,14	–

La relación $PM_{2.5}/PM_{10}$ fue 0,25 en E1 y 0,18 en E2, y baja de noche en ambas estaciones. La fracción gruesa (PM_{10} menos $PM_{2.5}$) promedió 17,1 µg/m³ en E1 y 22,1 µg/m³ en E2. El predominio de esta fracción suele relacionarse con polvo y material resuspendido del suelo o de las vías y con fuentes naturales, más que con procesos de combustión, que aportan sobre todo partículas finas. Dentro de la fracción fina, el PM_1 representó cerca de tres cuartas partes del $PM_{2.5}$ en las dos estaciones.

8. Conclusiones

- Ningún promedio diario de $PM_{2.5}$ ni de PM_{10} superó los niveles máximos permisibles de 24 horas de la Resolución 2254 de 2017. Los máximos, a condiciones de referencia, fueron 9,2 y 32,6 µg/m³ en E1 y 7,2 y 36,4 µg/m³ en E2.

- Frente a los valores de 24 horas de la OMS, la Unión Europea, Estados Unidos, México, Chile y Perú, no se presentaron sobrepasos.

- El ICA estuvo en la categoría Buena en todos los días, para los parametros $PM_{2.5}$ y PM_{10}.

- E1 presentó concentrcoines mas altas del PM_1, $PM_{2.5}$ y PM_4 que E2 en los 13 días comparables, mientras que, E2 más altas para los parameotros PM_{10} y PST en 12 de esos 13 días.

- Las concentraciones de PM aumentaron de noche y de madrugada y disminuye hacia el mediodía en las dos estaciones; el promedio nocturno superó al diurno en 29 % en E1 y en 41 % en E2. El PM muestra picos en las horas de mayor movilidad.

- Las partículas de material particulado mayores de 2,5 µm aportan el 80 % de la masa de PST en E1 y el 86 % en E2, con mayor peso de noche.

- A modo indicativo, los promedios de PM_{10} de la campaña superan la guía anual de la OMS y el valor anual de la UE, y el $PM_{2.5}$ de E1 supera ligeramente la guía anual de la OMS.

9. Referencias

Charron, A., & Harrison, R. M. (2005). Fine (PM2.5) and coarse (PM2.5-10) particulate matter on a heavily trafficked London highway: Sources and processes. Environmental Science & Technology, 39(20), 7768–7776. https://doi.org/10.1021/es050462i

Comité Europeo de Normalización. (1993). EN 481. Workplace atmospheres: Size fraction definitions for measurement of airborne particles.

Di Antonio, A., Popoola, O. A. M., Ouyang, B., Saffell, J., & Jones, R. L. (2018). Developing a relative humidity correction for low-cost sensors measuring ambient particulate matter. Sensors, 18(9), 2790. https://doi.org/10.3390/s18092790

Harrison, R. M., Yin, J., Mark, D., Stedman, J., Appleby, R. S., Booker, J., & Moorcroft, S. (2001). Studies of the coarse particle (2.5–10 μm) component in UK urban atmospheres. Atmospheric Environment, 35(21), 3667–3679. https://doi.org/10.1016/S1352-2310(00)00526-4

International Organization for Standardization. (1995). ISO 7708:1995. Air quality: Particle size fraction definitions for health-related sampling.

Met One Instruments. (2023). ES-405 Simultaneous Particulate Profiler. Ficha técnica v2.1 Rev. D.

Ministerio de Ambiente de Chile. (2011). Decreto Supremo N.° 12 de 2011. Norma primaria de calidad ambiental para material particulado fino respirable MP2,5.

Ministerio de Ambiente de Chile. (2022). Decreto Supremo N.° 12 de 2021. Norma primaria de calidad ambiental para material particulado respirable MP10. Diario Oficial, 4 de junio de 2022.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). Resolución 2254 de 2017, por la cual se adopta la norma de calidad del aire ambiente y se dictan otras disposiciones.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). Resolución 610 de 2010, por la cual se modifica la Resolución 601 de 2006.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire. Resolución 650 de 2010, ajustada por la Resolución 2154 de 2010.

Ministerio del Ambiente del Perú. (2017). Decreto Supremo N.° 003-2017-MINAM. Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire.

Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea. (2024). Directiva (UE) 2024/2881 relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa.

Parra, J. C., Gómez, M., Salas, H. D., Botero, B. A., Piñeros, J. G., Tavera, J., & Velásquez, M. P. (2024). Linking meteorological variables and particulate matter PM2.5 in the Aburrá Valley, Colombia. Sustainability, 16(23), 10250. https://doi.org/10.3390/su162310250

Patel, M. Y., Vannucci, P. F., Kim, J., Berelson, W. M., & Cohen, R. C. (2024). Towards a hygroscopic growth calibration for low-cost PM2.5 sensors. Atmospheric Measurement Techniques, 17(3), 1051–1060. https://doi.org/10.5194/amt-17-1051-2024

Ramírez, O., Sánchez de la Campa, A. M., Amato, F., Moreno, T., Silva, L. F., & de la Rosa, J. D. (2019). Physicochemical characterization and sources of the thoracic fraction of road dust in a Latin American megacity. Science of the Total Environment, 652, 434–446. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.214

Secretaría de Salud de México. (2021). NOM-025-SSA1-2021, Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto a las partículas suspendidas PM10 y PM2.5. Diario Oficial de la Federación, 27 de octubre de 2021.

South Coast Air Quality Management District, AQ-SPEC. (s. f.). Met One ES-405: Field evaluation, laboratory evaluation and summary report. https://www.aqmd.gov/aq-spec

U.S. Environmental Protection Agency. (2024). Reconsideration of the National Ambient Air Quality Standards for Particulate Matter. Final rule. 40 CFR Part 50.

Vanegas, S., Trejos, E. M., Aristizábal, B. H., Pereira, G. M., Hernández, J. M., Herrera Murillo, J., Ramírez, O., Amato, F., Silva, L. F. O., Rojas, N. Y., Zafra, C., & Pachón, J. E. (2021). Spatial distribution and chemical composition of road dust in two high-altitude Latin American cities. Atmosphere, 12(9), 1109. https://doi.org/10.3390/atmos12091109

Velásquez-García, M. P., Hernández, K. S., Vergara-Correa, J. A., Pope, R. J., Gómez-Marín, M., & Rendón, A. M. (2024). Long-range transport of air pollutants increases the concentration of hazardous components of PM2.5 in northern South America. Atmospheric Chemistry and Physics, 24, 11497–11520. https://doi.org/10.5194/acp-24-11497-2024

World Health Organization. (2021). WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Ginebra: WHO.

Anexo A. Registro fotográfico

Estación 1: Sede CARDER





Estación 2: Centro de Interpretación Ambiental



