






INFORME COMPARACION INTERLABORATORIO



SECRETARÍA DE
AMBIENTE



Cofinanciado por
la Unión Europea

  	METROLOGIA, MONITOREO Y MODELACIÓN	
	Informe Prueba Interlaboratorio	
	Código: PA10-PR03-M13	Versión: 1

**RED DE MONITORIO DE CALIDAD DEL AIRE - RMCAB
SUBDIRECCIÓN DE CALIDAD DEL AIRE, AUDITIVA Y VISUAL**

Andrea Corzo Álvarez

Subdirector de calidad del aire, Auditiva y Visual

José Hernán Garavito Calderón

Profesional Especializado

Gustavo Ávila Rojas

Profesional de calidad Metrológica


Luz Dary González González

Profesional de Campo

Darío Alejandro Gómez


Profesional de Campo

**Bogotá D.C
2025**

	METROLOGIA, MONITOREO Y MODELACIÓN	
	Informe Prueba Interlaboratorio	
	Código: PA10-PR03-M13	Versión: 1

Contenido

1. INTRODUCCIÓN	3
2. ANTECEDENTES	4
3. Objetivo	5
4. Alcance	5
5. Planeación de la prueba interlaboratorio	6
5.1. Documentación del organizador.....	6
5.2. Variables de evaluación	7
5.3. Instrumentos de medición	7
5.4. Selección de los laboratorios participantes	8
6. Metodología a emplear en la prueba interlaboratorio	9
6.1. Equipos empleados y configuración.....	9
6.2. Lugar de aplicación	10
6.3. Condiciones ambientales y/o meteorológicas.....	10
6.4. Tiempo de medición	12
7. Ejecución de la prueba interlaboratorio	13
8. Resultados de la prueba interlaboratorio	14
8.1. Material particulado PM2.5.....	14
8.2. Material particulado PM10.....	18
8.3. Dióxido de azufre (SO ₂).....	21
8.4. Dióxido de nitrógeno (NO ₂).....	24
8.5. Monóxido de carbono (CO)	27
9. Análisis estadístico de los resultados	30
9.1. Evaluación de la comparabilidad PM2.5.....	31
9.2. Evaluación de la comparabilidad PM ₁₀	33
9.3. Evaluación de la comparabilidad SO ₂ en el Ensayo CIL	35
9.4. Evaluación de la comparabilidad CO en el Ensayo CIL	39
10. Aplicabilidad y contribución a la RMCAB y la SDA	41
11. Conclusiones	43
12. Bibliografía	45

	METROLOGIA, MONITOREO Y MODELACIÓN	
	Informe Prueba Interlaboratorio	
	Código: PA10-PR03-M13	Versión: 1


1. INTRODUCCIÓN

En el marco del fortalecimiento de los ensayos de aptitud y del aseguramiento de la calidad de los datos generados por las redes de monitoreo de calidad del aire, la comparación interlaboratorio (CIL) constituye una herramienta fundamental para evaluar la confiabilidad y trazabilidad de las mediciones de contaminantes criterio de cada una de las redes participantes. Esta actividad permitió verificar el desempeño técnico de los métodos de medición bajo condiciones similares y comparables, así como identificar posibles sesgos, fuentes de incertidumbre y oportunidades de mejora en los sistemas de medición.

El presente informe documenta los resultados del ensayo de comparación interlaboratorio desarrollado entre la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB), la Red de Monitoreo del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (REDCAM) y el Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (SVCA-CAR), en el marco del contrato interadministrativo SDA-20251418 suscrito con la Secretaría Distrital de Ambiente. Asimismo, en el marco del proyecto Avandia, iniciativa de cooperación cofinanciada por la Unión Europea, se desarrolló la actividad de comparación interlaboratorio orientada al fortalecimiento técnico y metrológico de las redes de monitoreo de calidad del aire participantes. Este ejercicio fue coordinado por el Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, bajo lineamientos internacionales aplicables, incluyendo las normas ISO/IEC 17043, ISO 13528 e ISO/IEC 17025.

El ensayo tuvo como objetivo principal evaluar la comparabilidad de los métodos de referencia y/o equivalentes empleados para la medición de contaminantes criterio, específicamente PM_{2.5}, PM₁₀, SO₂, NO₂ y CO, mediante la aplicación de un diseño experimental basado en colocalización instrumental, control metrológico riguroso y análisis estadístico. Para este ejercicio, se emplearon equipos certificados bajo métodos FRM/FEM de la EPA, garantizando la coherencia técnica y la trazabilidad de las mediciones.

El desarrollo del interlaboratorio incluyó la verificación de condiciones operativas de los equipos, calibraciones trazables y verificables, control y validación de la calidad de los datos y la implementación de metodologías estadísticas para la evaluación de la concordancia, consistencia y correlación entre participantes. Asimismo, se consideraron aspectos clave como la incertidumbre de medición, la trazabilidad metrológica y el cumplimiento de criterios normativos internacionales. Los resultados presentados en este informe permiten establecer el grado de comparabilidad entre los participantes, aportando evidencia técnica para la validación del desempeño de los sistemas de medición y contribuyendo al fortalecimiento de la gestión de la calidad en redes de monitoreo de calidad del aire.

	METROLOGIA, MONITOREO Y MODELACIÓN	
	Informe Prueba Interlaboratorio	
	Código: PA10-PR03-M13	Versión: 1


2. ANTECEDENTES

Para realizar el monitoreo de calidad del aire, la SDA opera y administra la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB), el cual es un Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire Tipo IV Avanzado, que se compone de 19 estaciones automáticas ubicadas en diferentes puntos de la ciudad, las cuales monitorean datos horarios de concentraciones de contaminantes criterio: material particulado PM10, PM2.5, y gases contaminantes O3, CO, SO2, NO2, así como variables meteorológicas y el contaminante no criterio Black Carbon. La RMCAB se encuentra integrada al Laboratorio Ambiental de la SDA, y por lo tanto, debe cumplir con los requisitos de la norma NTC-ISO/IEC 17025:2017 que establece los requisitos aplicables a los laboratorios de ensayo y calibración.

Según lo dispuesto en el párrafo 2° del artículo 2.2.8.9.1.5 del Decreto 1076 de 2015, "Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible", se señala que los laboratorios que produzcan información cuantitativa, física, química y biótica para los estudios o análisis ambientales requeridos por las autoridades ambientales competentes, y los demás que produzcan información de carácter oficial relacionada con la calidad del medio ambiente y de los recursos naturales renovables, **deberán poseer certificado de acreditación correspondiente otorgado por el IDEAM.**

En cumplimiento de este mandato normativo, el Laboratorio Ambiental de la SDA cuenta actualmente con la acreditación otorgada por el Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, mediante Resolución 0738 del 7 de junio de 2023, para lo cual ha venido trabajando permanentemente desde años atrás, y dando cumplimiento a todos los requisitos y actividades para alcanzar dicha acreditación. Ahora bien con la entrada en vigencia de la Resolución 104 de 2022 de IDEAM "*Por medio de la cual se establecen los requisitos y el procedimiento para la Acreditación de Laboratorios Ambientales en Colombia y se toman otras determinaciones*", se hace necesario tener un sistema de gestión con base en la NTC-ISO/IEC 17025:2017, y adicionalmente el título VIII artículo 66,67 y 68 establece... "*Obligatoriedad del ensayo de aptitud. Todo laboratorio interesado en obtener y mantener la acreditación otorgada por el IDEAM, deberá presentar los resultados de los ensayos de aptitud para las matrices/variables/métodos definidas en su alcance teniendo en cuenta la frecuencia establecida en el presente acto administrativo. Es responsabilidad de los laboratorios realizar la búsqueda de los programas de ensayos de aptitud disponibles y participar en los mismos, de tal manera que se cubran todas las variables incluidas dentro del alcance de su acreditación.*" Y en un apartado del Artículo 68° establece... *En caso que no estén disponibles los programas de **Ensayos de Aptitud** o no sean apropiados al alcance de la acreditación, los laboratorios deberán dar seguimiento a su desempeño mediante la participación en **ensayos colaborativos, comparaciones interlaboratorios** de los ensayos, calibraciones o mediciones dentro del alcance de acreditación.*

Por lo anterior, y tras realizar una búsqueda exhaustiva de proveedores de ensayos de aptitud en la matriz calidad del aire para los métodos de medición utilizados en la RMCAB, se encontró que no existe disponibilidad de este tipo de proveedores en el país, por lo tanto, para cumplir con

	METROLOGIA, MONITOREO Y MODELACIÓN	
	Informe Prueba Interlaboratorio	
	Código: PA10-PR03-M13	Versión: 1

el requisito de la Resolución 104 de 2022, la opción viable y disponible es la realización de comparaciones interlaboratorio.

Cooperación internacional

El proyecto AVANTIA (“Moving towards Recovery: Bogotá’s transportation system as a catalyst for environmental sustainability and gender equality in the post-COVID-19 era”) es una acción cofinanciada por la UE (Contrato CS0-LA-2021/4278-394), implementada del 1 de abril de 2022 al 31 de marzo de 2026, coordinada por Metropolis junto con Bogotá Distrito Capital y socios como ISGlobal y el Ayuntamiento de Madrid.

Entre los alcances más significativos del proyecto, se buscaba robustecer la confiabilidad de los datos oficiales de calidad del aire mediante procesos de verificación (incluida la **comparación interlaboratorio**) mediante la *Actividad 2.1.1 Fortalecer la verificación y validación de los procesos de medición de la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB), en colaboración con organismos certificadores, con el fin de construir una comunidad internacional de buenas prácticas.*

Para lograr dar cumplimiento a la actividad propuesta, se contrató a la institución universitaria Politécnico Jaime Isaza Cadavid, que mediante el Grupo de Higiene y Gestión Ambiental (GHYGAM), posee la idoneidad y experiencia para desarrollar la consultoría para la elaboración de protocolos técnicos de comparación interlaboratorio, informes finales y toda la logística necesaria.


3. Objetivo

Determinar la comparabilidad de los métodos seleccionados para la medición de contaminantes criterio PM2.5, PM10, SO2, NO2, O3 y CO entre los participantes del ensayo CIL.

4. Alcance

El presente informe comprende la planificación, ejecución, análisis e interpretación del ensayo de comparación interlaboratorio desarrollado en la ciudad de Medellín, Antioquia entre la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB), la Red de Monitoreo de Calidad del Aire del Valle de Aburrá (REDCAM) y el Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (SVCA-CAR), para la evaluación de la comparabilidad de los métodos de medición de contaminantes criterio.

El alcance comprende la evaluación de los contaminantes PM2.5, PM10, SO₂, NO₂ y CO, medidos mediante analizadores automáticos certificados bajo métodos de referencia (FRM/FEM) de la EPA, operando en condiciones de co-localización y bajo criterios de aseguramiento

	METROLOGIA, MONITOREO Y MODELACIÓN	
	Informe Prueba Interlaboratorio	
	Código: PA10-PR03-M13	Versión: 1

metrológico. Se incluyen las actividades de verificación/Calibración de equipos, revisión de certificados de calibración para equipos de referencia, análisis de trazabilidad metrológica y evaluación de la incertidumbre de medición asociada a los equipos de cada participante.

Asimismo, el informe cubre el diseño metodológico, experimental y logístico del ensayo, incluyendo la selección de estaciones de monitoreo en la ciudad de Medellín, de igual forma las condiciones ambientales de operación, cronograma de muestreo y control de calidad de los datos generados. Se incorpora el análisis estadístico de los resultados mediante herramientas como correlación, regresión (incluyendo regresión de Deming), análisis de consistencia, pruebas de normalidad, identificación de datos atípicos y evaluación del grado de concordancia entre participantes (Bland–Altman).

El alcance también contempla la evaluación integral de la comparabilidad, Así como la verificación del cumplimiento frente a criterios normativos internacionales aplicables. Finalmente, se incluyen las conclusiones, recomendaciones y declaraciones de conformidad derivadas del desempeño observado durante el ensayo.

Se excluyen del alcance del presente informe la evaluación de contaminantes no considerados en el diseño del ensayo, la operación rutinaria de las redes fuera del periodo del interlaboratorio y cualquier análisis que no esté soportado en los datos generados bajo las condiciones controladas definidas para este ensayo.


5. Planeación de la prueba interlaboratorio

La planeación del ensayo de comparación interlaboratorio se estructuró con el propósito de garantizar la validez técnica y la comparabilidad de los resultados obtenidos entre los participantes, bajo criterios alineados con buenas prácticas internacionales para ensayos de aptitud, donde se organizó de la siguiente forma:

5.1. Documentación del organizador

El ensayo fue coordinado por el Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, en el marco del contrato interadministrativo con la Secretaría Distrital de Ambiente. El organizador definió la documentación técnica necesaria para la ejecución del CIL, incluyendo:

Protocolo del ensayo interlaboratorio, Plan metodológico, experimental y logístico, Criterios de aceptación y evaluación de resultados, Lineamientos de aseguramiento de la calidad y Control documental.

	METROLOGIA, MONITOREO Y MODELACIÓN	
	Informe Prueba Interlaboratorio	
	Código: PA10-PR03-M13	Versión: 1

Esta documentación permitió garantizar la estandarización de las actividades, la trazabilidad de las decisiones y la reproducibilidad del ensayo para los participantes.

5.2. Variables de evaluación

Las variables consideradas en el ensayo correspondieron a las concentraciones de contaminantes criterio, medidas en diferentes resoluciones temporales (horaria, octohoraria y diaria), específicamente para los siguientes contaminantes:

Material particulado: PM2.5 y PM10

Gases contaminantes: SO₂, NO₂ y CO

Adicionalmente, se consideraron variables derivadas para la evaluación de comparabilidad, tales como:

- Incertidumbre de medición
- Trazabilidad metrológica

Estas variables permitieron evaluar de manera integral el desempeño de los métodos de medición entre los participantes, considerando aspectos asociados a la exactitud, precisión, repetibilidad y comparabilidad de los resultados obtenidos bajo condiciones de operación equivalentes. Asimismo, facilitaron la identificación de posibles desviaciones sistemáticas, diferencias en la respuesta instrumental y variaciones asociadas a las condiciones operativas y metrológicas de cada sistema de medición, aportando criterios técnicos para la verificación de la confiabilidad y consistencia de los datos generados.

5.3. Instrumentos de medición


Los instrumentos utilizados en el ensayo correspondieron a analizadores automáticos de contaminantes criterio y monitores de material particulado, certificados bajo métodos de referencia y/o equivalentes (FRM/FEM) de la EPA.

Para la medición de gases (SO₂, NO₂ y CO), se emplearon analizadores basados en principios de: Fluorescencia ultravioleta (SO₂), Quimioluminiscencia (NO₂), Absorción infrarroja no dispersiva – NDIR (CO)

Para material particulado (PM2.5 y PM10), se utilizaron monitores basados en el principio de atenuación beta (β -ATT).

Adicionalmente, se emplearon:

- Patrones de referencia trazables a estándares internacionales
- Materiales de referencia certificados (gases patrón)

	METROLOGIA, MONITOREO Y MODELACIÓN	
	Informe Prueba Interlaboratorio	
	Código: PA10-PR03-M13	Versión: 1

- Todos los instrumentos contaron, en su mayoría, con certificados de calibración vigentes y verificación previa a la ejecución del ensayo, asegurando condiciones adecuadas de operación y control metrológico.

5.4. Selección de los laboratorios participantes

La selección de los laboratorios participantes en el ensayo de comparación interlaboratorio se realizó considerando criterios técnicos, operativos e institucionales los cuales fueron seleccionadas entidades responsables de la operación de sistemas de vigilancia atmosférica con trayectoria reconocida, infraestructura técnica disponible y utilización de métodos de referencia equivalentes para el monitoreo automático de calidad del aire, donde se priorizó la participación de organizaciones con capacidad para aportar equipos, personal técnico competente y registros metrológicos asociados a sus sistemas de medición.


Con base en estos criterios los participantes fueron los siguientes:

- **Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB)**, operada por la Secretaría Distrital de Ambiente.
- **Red de Monitoreo de Calidad del Aire del Valle de Aburrá (REDCAM)**, referente nacional por su trayectoria técnica y experiencia en operación de redes automáticas de monitoreo atmosférico.
- **Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (SVCA-CAR)**, incorporado para la comparación en contaminantes particulados y fortalecimiento del alcance regional del ejercicio.

La participación de estas entidades permitió integrar capacidades institucionales complementarias y comparación del desempeño de distintos equipos, bajo condiciones controladas de ensayo.

Para preservar los principios de imparcialidad, objetividad y confidencialidad durante la evaluación estadística de resultados, los participantes fueron codificados de manera aleatoria como P1, P2 y P3, evitando la asociación directa entre resultados y entidad participante en las etapas analíticas del informe.

Si bien la selección de participantes aporta representatividad nacional, no equivale necesariamente a una muestra estadísticamente representativa de todas las redes del país. Por tanto, los resultados del presente Interlaboratorio deben interpretarse como evidencia comparativa entre los participantes convocados y no como extrapolación automática al desempeño de todas las redes de monitoreo nacionales.

	METROLOGIA, MONITOREO Y MODELACIÓN	
	Informe Prueba Interlaboratorio	
	Código: PA10-PR03-M13	Versión: 1

6. Metodología a emplear en la prueba interlaboratorio

La metodología de la prueba se diseñó para evaluar la comparabilidad de los resultados obtenidos por los participantes mediante mediciones simultáneas, bajo condiciones operativas controladas y comparables, donde el propósito central fue determinar si los métodos por cada participante producen resultados técnicamente equivalentes dentro de criterios aceptables de calidad, sesgos o incertidumbre. El enfoque principal consistió en la co-localización de equipos en puntos de monitoreo previamente definidos este enfoque consistió en instalar simultáneamente los equipos en un mismo punto bajo mismas condiciones ambientales, con el fin de reducir la variabilidad espacial y asegurar que las diferencias observadas entre resultados estuvieran asociadas al desempeño de los métodos de medición y no a factores externos.

La ejecución de la prueba contempló etapas de instalación, estabilización de los equipos, verificación funcional, calibración inicial cuando aplicó, obtención continua de datos, validación preliminar de registros de calibración para los equipos de referencia y análisis comparativo posterior. Los resultados fueron evaluados mediante herramientas estadísticas orientadas a determinar correlación, concordancia, consistencia e incertidumbre de medición entre participantes, estas metodologías permiten examinar no solo la relación lineal entre participantes, sino también el sesgo sistemático, la dispersión de resultados y el nivel de acuerdo entre métodos.


6.1. Equipos empleados y configuración

Para la prueba interlaboratorio se utilizaron analizadores automáticos certificados bajo métodos de referencia y/o equivalentes reconocidos internacionalmente para contaminantes criterio. Los equipos empleados incluyeron:

Monitores automáticos para PM2.5 y PM10 basados en el método de medición: atenuación beta.

- Analizadores de SO₂ por fluorescencia ultravioleta.
- Analizadores de NO₂ por quimioluminiscencia.
- Analizadores de CO por absorción infrarroja no dispersiva (NDIR).

La configuración operativa consideró la instalación en co-localización con distancias y alturas técnicamente compatibles se realizó en líneas de muestreo independientes o equivalentes según el diseño de igual forma, se sincronizo el sistema horario de adquisición de datos, rangos de medición ajustados, se verifico el caudal, cero y span a los equipos que aplicaba.

	METROLOGIA, MONITOREO Y MODELACIÓN	
	Informe Prueba Interlaboratorio	
	Código: PA10-PR03-M13	Versión: 1

6.2. Lugar de aplicación

La prueba se desarrolló en estaciones de monitoreo seleccionadas por su representatividad operacional y condiciones adecuadas para la instalación simultánea de equipos.

Los sitios de aplicación fueron definidos considerando:

- Seguridad y acceso técnico.
- Disponibilidad eléctrica y de comunicaciones.
- Historial operativo confiable de la estación.

De acuerdo con el diseño del ensayo, los equipos fueron ubicados en los siguientes puntos de monitoreo:

- **Institución Educativa Pedro Octavio Amado:** Estación empleada para la instalación y comparación de monitores de PM_{2.5}.
- **Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid (MED-PCJIC)** Estación empleada para la instalación y comparación de monitores de PM₁₀ y analizadores de CO.
- **Casa de Justicia de Itagüí (ITA-CJUS):** estación empleada para la instalación de analizadores de NO₂ y SO₂.

La distribución de los equipos respondió a criterios relacionados con disponibilidad de la infraestructura, suministro eléctrico y conectividad, en cada sitio se procuró mantener alturas de muestreo, separaciones entre entradas de muestra y condiciones físicas compatibles con los lineamientos técnicos, reduciendo posibles interferencias por ubicación.

6.3. Condiciones ambientales y/o meteorológicas

Durante la ejecución de la prueba se registraron y analizaron las condiciones ambientales y meteorológicas que pudieran influir en la medición de contaminantes o en el desempeño instrumental.

Entre las variables consideradas se incluyeron:

- Temperatura ambiente
- Humedad relativa
- Presión atmosférica
- Velocidad y dirección del viento
- Precipitación (cuando aplicó)





 ALCALDÍA MAJOR DE BOGOTÁ D.C.	 SECRETARÍA DE AMBIENTE	 BOGOTÁ	METROLOGIA, MONITOREO Y MODELACIÓN	
			Informe Prueba Interlaboratorio	
			Código: PA10-PR03-M13	Versión: 1

Tabla 1. Resumen de condiciones ambientales por estación de monitoreo

Fecha	Temperatura (°C)	Presión (mmHg)	Precipitación (mm)	Humedad relativa (%)
Estación MED-UDEM*				
24/11/2025	20.46	633.55	2.55	86.28
25/11/2025	21.71	632.68	0.40	81.14
26/11/2025	22.75	631.98	0.02	78.07
27/11/2025	20.52	633.11	0.01	86.04
28/11/2025	21.06	632.71	0.28	82.04
29/11/2025	20.59	633.29	0.84	82.80
30/11/2025	21.19	633.35	4.02	82.56
1/12/2025	18.92	634.31	5.31	88.29
2/12/2025	19.55	634.48	4.66	87.31
Estación ITA-CJUS				
21/11/2025	20.99	634.99	0.00	69.97
22/11/2025	21.95	634.45	0.00	69.20
23/11/2025	21.72	634.25	6.03	75.31
24/11/2025	20.77	634.46	13.71	81.19
25/11/2025	21.80	634.38	1.09	75.30
26/11/2025	23.02	633.57	0.31	71.12
27/11/2025	21.21	634.22	0.01	76.17
28/11/2025	21.22	634.39	1.01	73.62
29/11/2025	21.23	634.89	7.34	74.30
30/11/2025	21.56	634.60	16.48	73.52
1/12/2025	19.14	635.25	31.20	82.93
Estación MED-PCJIC				
22/11/2025	22.36	637.00	0.00	73.74
23/11/2025	22.05	637.00	2.26	79.12
24/11/2025	20.75	637.35	0.92	83.54
25/11/2025	21.85	637.35	1.38	80.66
26/11/2025	23.34	636.41	0.18	75.10
27/11/2025	21.39	636.95	0.05	80.29
28/11/2025	21.72	637.25	0.19	77.97
29/11/2025	21.57	637.59	0.52	78.44
30/11/2025	22.10	637.73	6.04	77.25
1/12/2025	19.48	638.14	7.61	84.37
2/12/2025	20.22	638.26	5.37	82.11

	METROLOGIA, MONITOREO Y MODELACIÓN	
	Informe Prueba Interlaboratorio	
	Código: PA10-PR03-M13	Versión: 1

Estas condiciones fueron documentadas para interpretar comportamientos atípicos, variaciones temporales o posibles interferencias operativas. Esto es relevante porque ignorar meteorología puede llevar a atribuir diferencias al laboratorio cuando en realidad provienen de episodios atmosféricos.

6.4. Tiempo de medición

El tiempo de medición definido para la prueba interlaboratorio tuvo como finalidad garantizar la obtención de un volumen suficiente de datos comparables y representativos para evaluar el desempeño de los equipos participantes bajo condiciones reales de operación en cada una de las estaciones. La duración del ensayo fue establecida considerando tiempos de estabilización y verificación de los equipos, durante el periodo de medición, los equipos operaron de manera simultánea y continua bajo esquema de co-localización, registrando concentraciones de contaminantes con la misma resolución temporal programada para cada parámetro.

Esta simultaneidad permitió que todos los participantes estuvieran expuestos a las mismas condiciones ambientales y a una masa de aire equivalente, reduciendo sesgos asociados a cambios temporales en la calidad del aire. Donde se incluyó tres fases principales:


- a. **Fase de estabilización inicial:** Este periodo es posterior a la instalación y encendido de los equipos, necesario para alcanzar condiciones normales de operación.
- b. **Fase Verificación/Calibración:** Periodo en el cual se realiza el aseguramiento de las condiciones adecuadas de operación y control metrológico de los equipos.
- c. **Fase efectiva de medición:** intervalo durante el cual se recopilaron los datos utilizados para el análisis comparativo.
- d. **Fase de cierre o retiro:** etapa final para verificar integridad de registros y condiciones operativas antes del desmontaje.

Los datos obtenidos durante mantenimientos, calibraciones, interrupciones eléctricas, fallas instrumentales o periodos sin estabilidad operativa fueron excluidos del análisis cuando correspondió, con el fin de preservar la calidad del conjunto de datos evaluado.

La duración del ensayo permitió calcular indicadores en diferentes escalas temporales, tales como:

- Promedios horarios.
- Promedios octohorarios, cuando aplicó.
- Promedios diarios o acumulados del periodo evaluado.

Este enfoque permitió analizar tanto la respuesta inmediata de los equipos frente a cambios rápidos de concentración como la consistencia en periodos más amplios, debido a que en un periodo de medición demasiado corto puede generar conclusiones débiles, ya que limita la variabilidad observada y reduce la capacidad para detectar sesgos sistemáticos entre participantes. Por el contrario, periodos suficientemente amplios aumentan la confiabilidad

	METROLOGIA, MONITOREO Y MODELACIÓN	
	Informe Prueba Interlaboratorio	
	Código: PA10-PR03-M13	Versión: 1

estadística y permiten evaluar el comportamiento instrumental frente a condiciones meteorológicas y operativas diversas.

En consecuencia, el tiempo de medición fue entre el 21 de noviembre y el 02 de diciembre de 2025, para una duración total de doce (12) días calendario. No obstante, el periodo real de medición varió según la estación, con ventanas operativas entre nueve (9) y once (11) días, de acuerdo con la instalación, disponibilidad y configuración de los equipos.

7. Ejecución de la prueba interlaboratorio

La ejecución de la prueba se desarrolló entre el 21 de noviembre y el 02 de diciembre de 2025, periodo durante el cual los participantes operaron sus equipos en estaciones previamente seleccionadas bajo un esquema de co-localización. La duración efectiva de monitoreo varió entre estaciones según el cronograma de instalación y disponibilidad operativa

Durante la etapa inicial se realizaron actividades de ingreso a sitio, verificación de condiciones locativas, revisión de suministro eléctrico, disponibilidad de espacio, condiciones de seguridad y compatibilidad técnica para la instalación simultánea de los equipos. Posteriormente, se efectuó el montaje de los equipos, conexiones eléctricas y líneas de muestreo.


Una vez instalados los equipos, se desarrolló una fase de verificación operativa y estabilización, en la cual se revisaron parámetros críticos tales como:

- Encendido y autodiagnóstico de los instrumentos.
- Caudales de operación y presión interna.
- Estado de filtros, bombas y líneas de muestreo.
- Verificación de cero y span, a los equipos que aplicó.
- Sincronización horaria de registros.
- Ausencia de alarmas o fallas activas.

Superada esta etapa, inició la fase efectiva de medición continua, durante la cual los equipos registraron concentraciones de los contaminantes evaluados con el periodo de registro programado. Los datos fueron almacenados en los equipos correspondientes y descargados de forma manual y sometidos a seguimiento operativo periódico por parte del personal técnico responsable.

Durante la prueba se efectuaron rondas de supervisión para confirmar el funcionamiento estable de los equipos, identificar eventos no programados y documentar cualquier incidencia que pudiera afectar la calidad de los resultados, tales como interrupciones eléctricas, mantenimientos correctivos, reinicios de sistema o condiciones meteorológicas extremas.

Finalizado el periodo de medición, se procedió al cierre técnico del ensayo, que incluyó descarga y respaldo de bases de datos, revisión preliminar de completitud de registros, desmontaje de equipos cuando correspondió y consolidación de evidencias documentales de campo.

	METROLOGIA, MONITOREO Y MODELACIÓN	
	Informe Prueba Interlaboratorio	
	Código: PA10-PR03-M13	Versión: 1

La calidad del ensayo depende en gran medida de esta fase, ya que errores en instalación, diferencias de configuración, fallas no detectadas o registros incompletos pueden introducir sesgos comparativos que luego no siempre son corregibles mediante análisis estadístico.

8. Resultados de la prueba interlaboratorio

Los resultados obtenidos en la prueba interlaboratorio permitieron evaluar el nivel de desempeño comparativo de los participantes (RMCAB – REDCAM - SVCA-CAR), en la medición de contaminantes criterio atmosféricos, mediante el análisis de series de datos generadas en condiciones de co-localización, operación simultánea y bajo un marco común de aseguramiento de la calidad. El objetivo principal del análisis fue determinar si los sistemas de medición presentaron comportamientos equivalentes, consistentes y técnicamente aceptables frente a los criterios establecidos para este tipo de ejercicios.

Previamente al análisis comparativo, la información recopilada fue sujeta a procesos de depuración y validación, orientados a excluir registros afectados por fallas instrumentales, interrupciones eléctricas, valores atípicos no justificables o inconsistencias de captura. Esta depuración permitió trabajar con un conjunto de datos representativo y confiable para la interpretación estadística posterior.


El análisis evidenció que el grado de comparabilidad no fue homogéneo para todos los contaminantes evaluados. En términos generales, los contaminantes con señales más estables o con mayores concentraciones ambientales tendieron a mostrar mejores niveles de asociación estadística entre participantes. En contraste, contaminantes con concentraciones bajas, alta variabilidad temporal o mayor sensibilidad a interferencias instrumentales presentaron dispersiones más marcadas y menores niveles de concordancia.

Los resultados de la prueba interlaboratorio se presentan a continuación de manera consolidada, destacando los principales hallazgos de comparabilidad, consistencia técnica y desempeño relativo de los participantes para cada parámetro evaluado.

8.1. Material particulado PM2.5

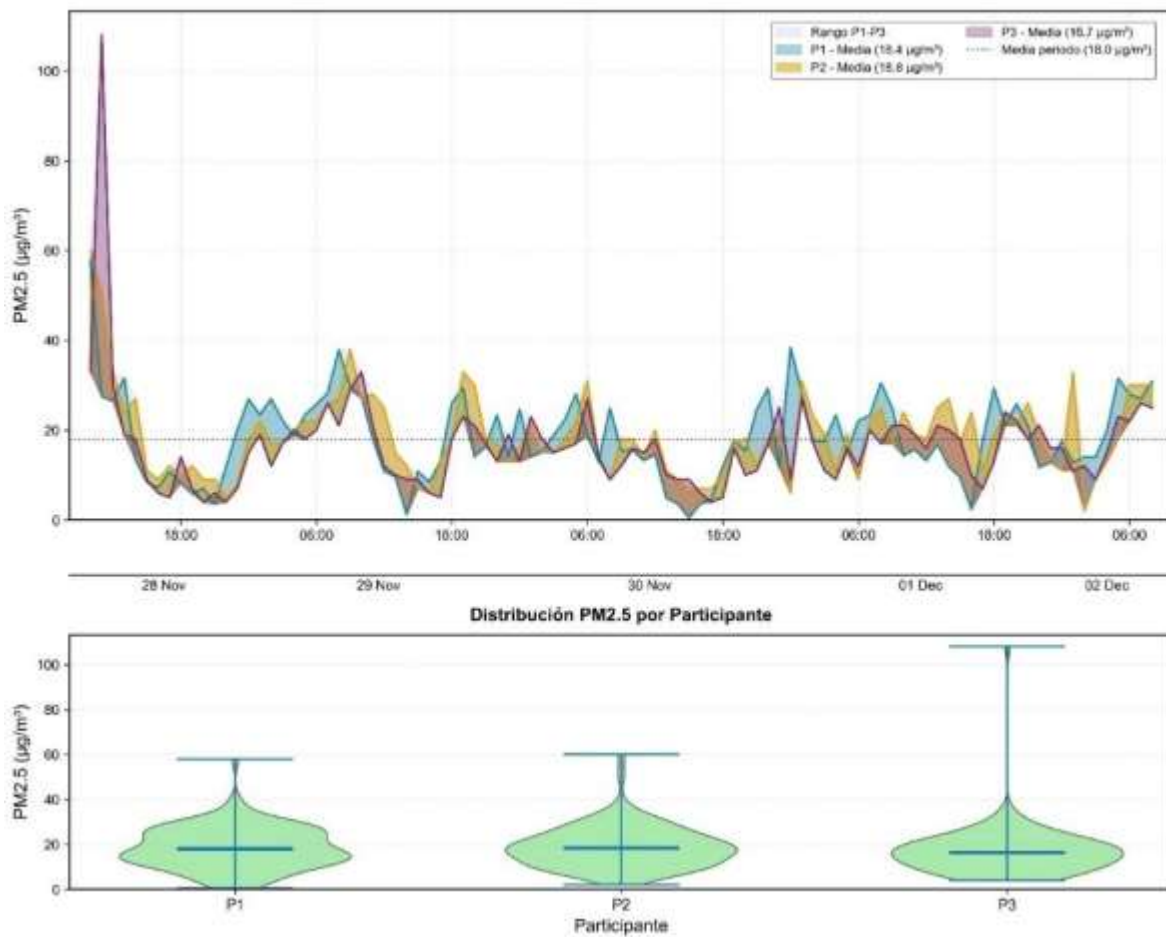
Para PM2.5, los resultados evidenciaron un comportamiento general consistente entre los equipos participantes, con tendencias temporales similares y capacidad adecuada para identificar incrementos y disminuciones en las concentraciones ambientales durante el periodo de medición. La comparación estadística mostró niveles favorables de asociación entre series de datos, lo que sugiere adecuada respuesta instrumental frente a eventos comunes de concentración.

No obstante, se identificaron diferencias puntuales en algunos intervalos de medición, posiblemente asociadas a sensibilidad del equipo, condiciones de mantenimiento, variabilidad en

	METROLOGIA, MONITOREO Y MODELACIÓN	
	Informe Prueba Interlaboratorio	
	Código: PA10-PR03-M13	Versión: 1

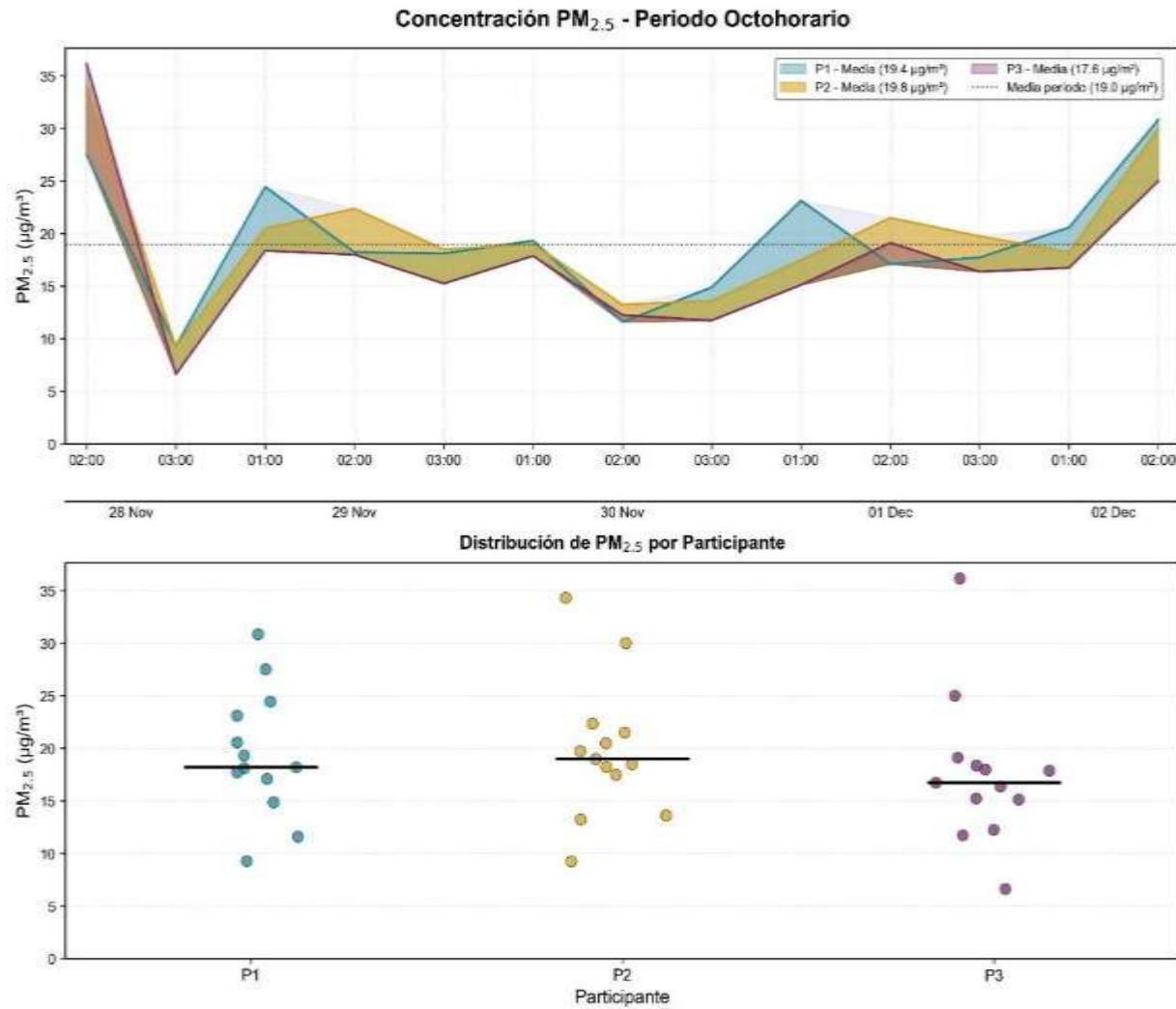
el sistema de muestreo o respuesta frente a cambios rápidos en la carga particulada. Estas diferencias no necesariamente invalidan la comparabilidad, pero sí indican la necesidad de mantener controles periódicos de flujo, limpieza de líneas y verificaciones operativas. En términos generales, el desempeño observado para PM_{2.5} fue satisfactorio y coherente con la aplicación de monitores equivalentes para este contaminante.

Figura 1. Serie de tiempo media horaria PM_{2.5} (µg/m³)
Concentración PM_{2.5} - Periodo Horario



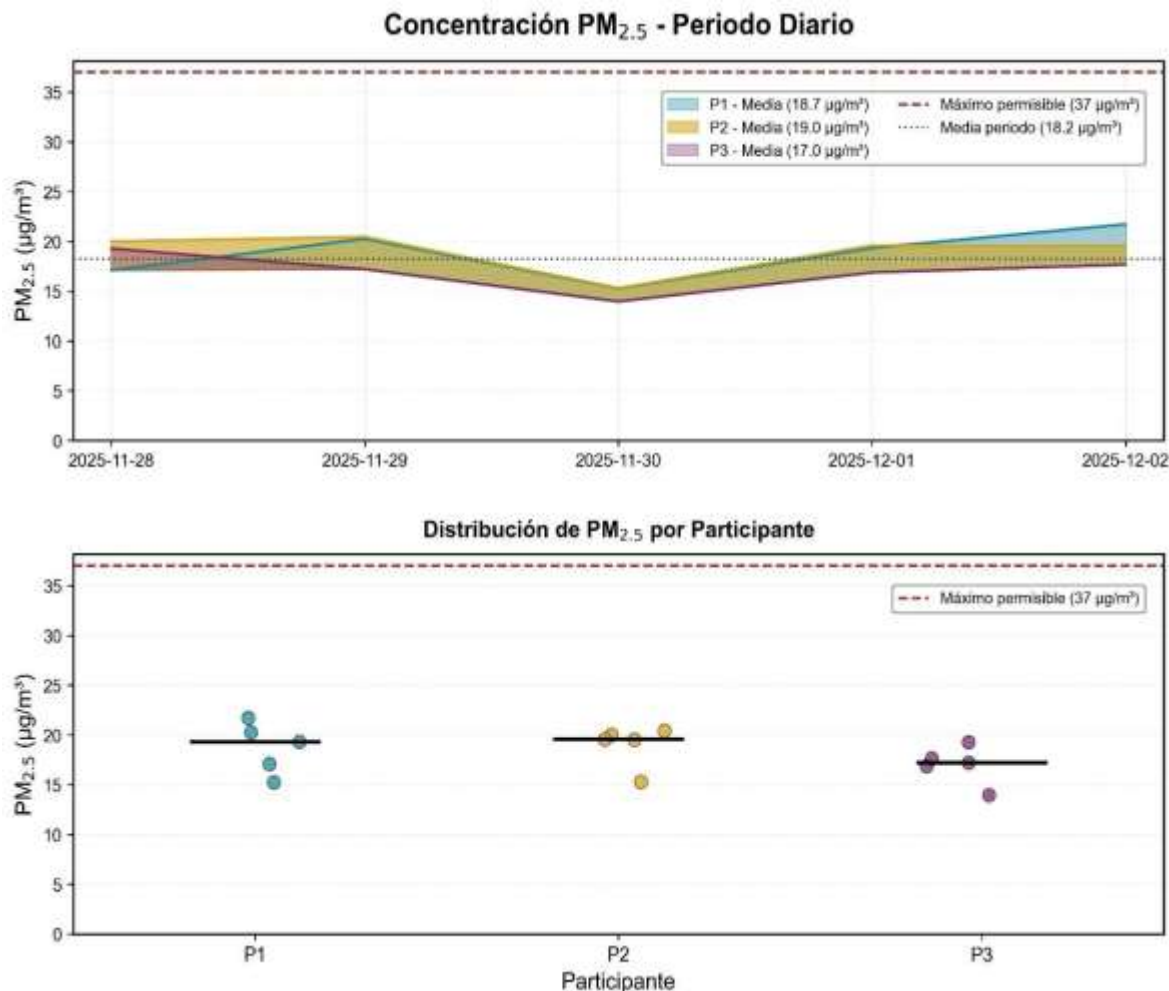
Fuente: Elaboración (Grupo GHYAM), 2026

Figura 2. Serie de tiempo media octohoraria $PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$)



Fuente: Elaboración (Grupo GHYAM), 2026

Figura 3. Serie de tiempo media diaria (24 horas) $PM_{2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)



Fuente: Elaboración (Grupo GHYGAM), 2026

La comparación de los tres niveles de agrupamiento evidencia una tendencia consistente: a medida que este aumenta, se reduce la variabilidad extrema de los datos y se observa una mejor aproximación al supuesto de normalidad, aunque dicho comportamiento no se presenta de forma uniforme entre los participantes. En este contexto, el promedio octohorario representa un nivel intermedio en el cual se atenúan de manera apreciable los picos horarios y mejora el comportamiento estadístico de las distribuciones, sin perder completamente la información asociada a la variabilidad intradiaria.

Los resultados de $PM_{2.5}$ sugieren una adecuada capacidad de los equipos para medir fracciones finas del material particulado y seguir la dinámica temporal del contaminante. Las diferencias observadas fueron compatibles con factores normales de operación, tales como variaciones de flujo, sensibilidad del detector o acumulación de partículas en componentes internos. En términos prácticos, los datos respaldan la confiabilidad del monitoreo para este parámetro

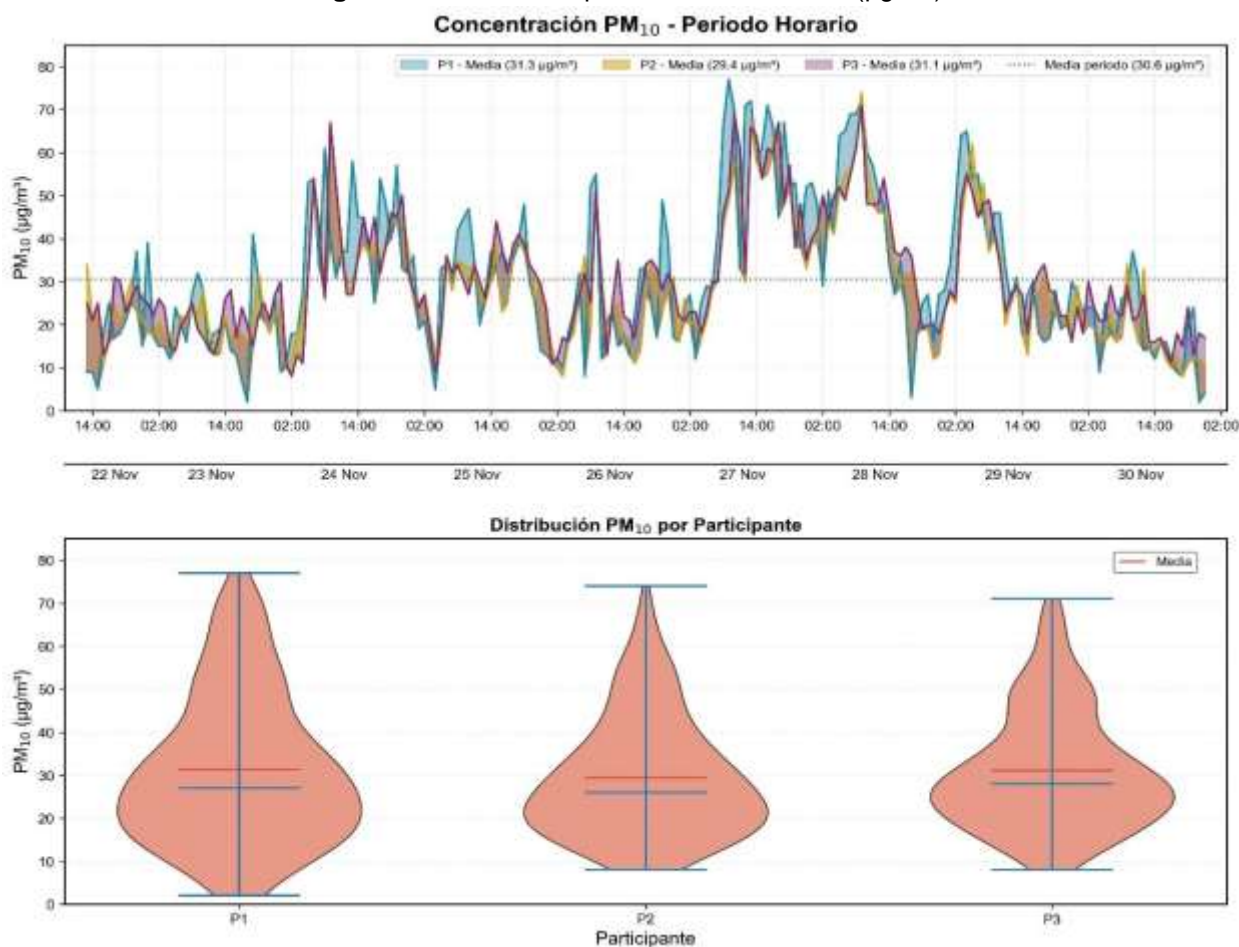
8.2. Material particulado PM10

En PM10 se observaron niveles adecuados de concordancia entre participantes, especialmente en periodos de estabilidad atmosférica. Sin embargo, la variabilidad fue ligeramente mayor frente a la observada en PM2.5, comportamiento esperable debido a la influencia de partículas gruesas, resuspensión de polvo, turbulencia local y heterogeneidad espacial más marcada.

Los equipos mostraron capacidad para seguir la tendencia general de concentraciones, aunque con diferencias moderadas en algunos picos de medición. Esto puede relacionarse con ubicación de inlets, dinámica local del flujo de aire o diferencias en eficiencia de captación de fracciones particuladas de mayor tamaño.

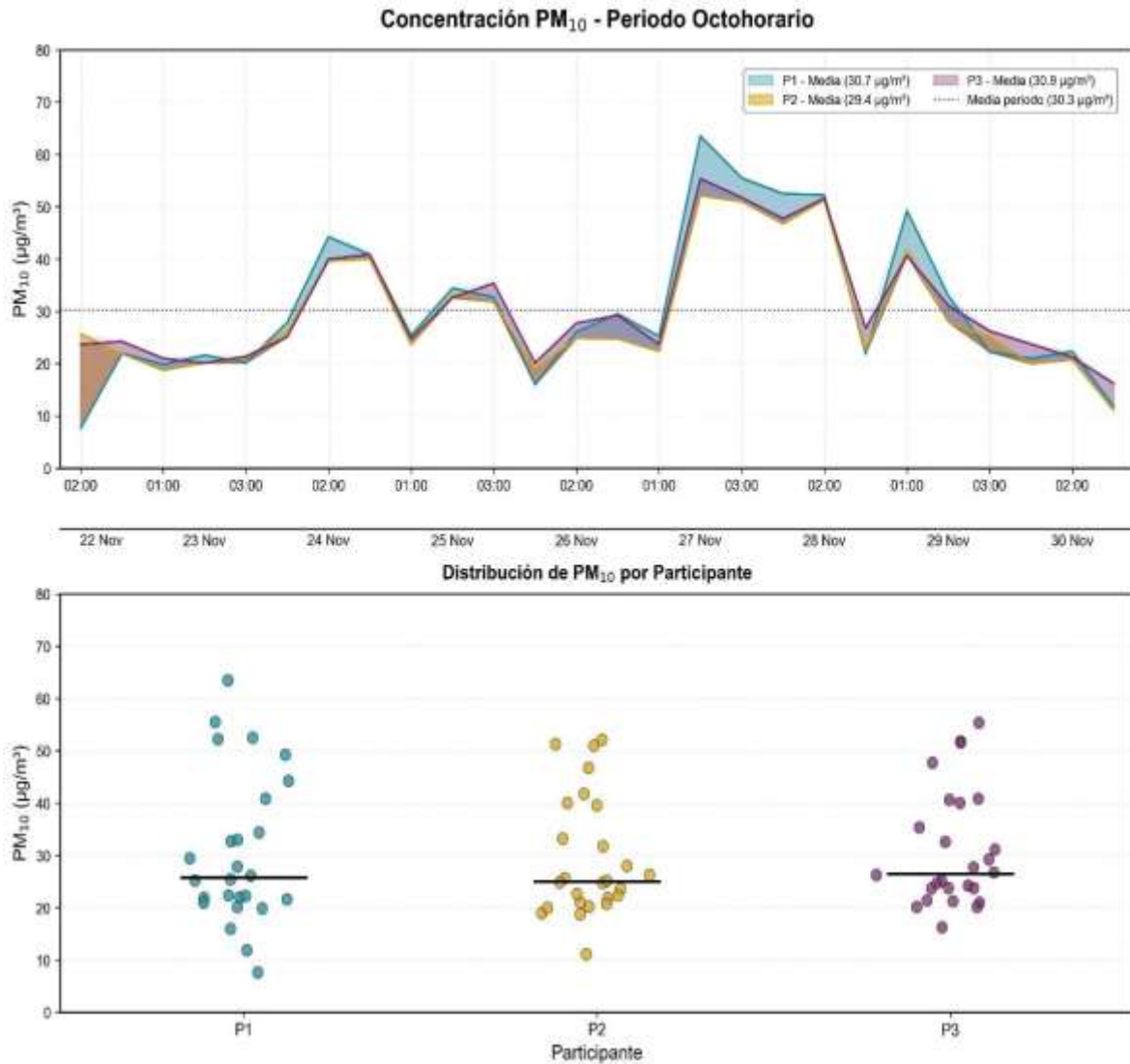
El resultado global indica comparabilidad aceptable, con recomendación de fortalecer criterios de instalación física y mantenimiento preventivo.

Figura 4. Serie de tiempo media horaria PM₁₀ (µg/m³)



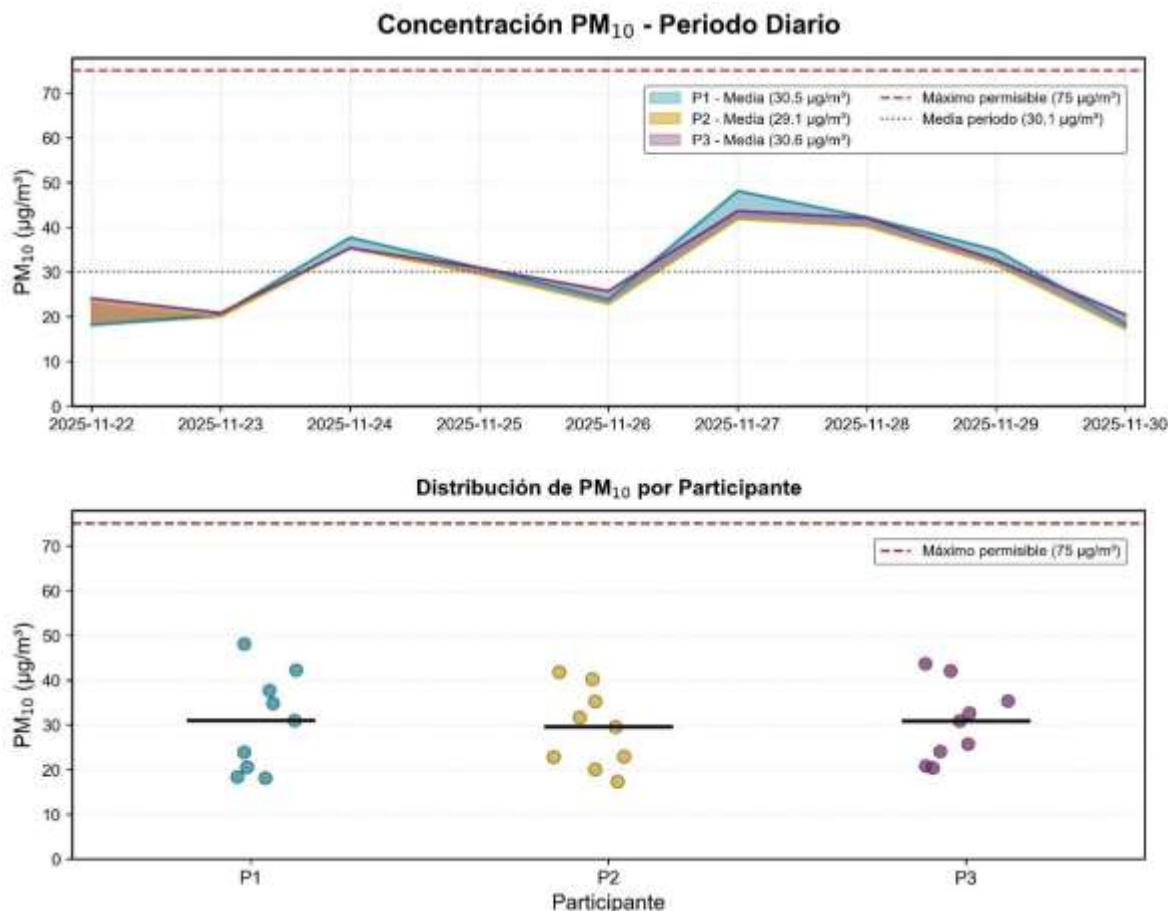
Fuente: Elaboración (Grupo GHYAM), 2026

Figura 5. Serie de tiempo media octohoraria PM₁₀ (µg/m³)



Fuente: Elaboración (Grupo GHYGM), 2026


Figura 6. Serie de tiempo media diaria (24 horas) PM₁₀ (µg/m³)



Fuente: Elaboración (Grupo GHYGAM), 2026

La comparación de los tres niveles de agrupamiento evidencia una tendencia consistente: a medida que éste aumenta, se reduce la variabilidad extrema de los datos y se observa una mejor aproximación al supuesto de normalidad. En este contexto, el promedio diario representa un nivel apropiado en el cual se atenúan de manera apreciable los picos horarios y mejora el comportamiento estadístico de las distribuciones, aunque disminuye la información asociada a la variabilidad intradiaria.

Para PM₁₀ se observó una variabilidad mayor respecto a PM_{2.5}, condición técnicamente razonable debido a la naturaleza heterogénea de las partículas gruesas y su sensibilidad a fenómenos locales como resuspensión de polvo o turbulencia. Por ello, discrepancias moderadas no deben interpretarse automáticamente como falla instrumental, sino como parte de la complejidad propia del contaminante.

	METROLOGIA, MONITOREO Y MODELACIÓN	
	Informe Prueba Interlaboratorio	
	Código: PA10-PR03-M13	Versión: 1

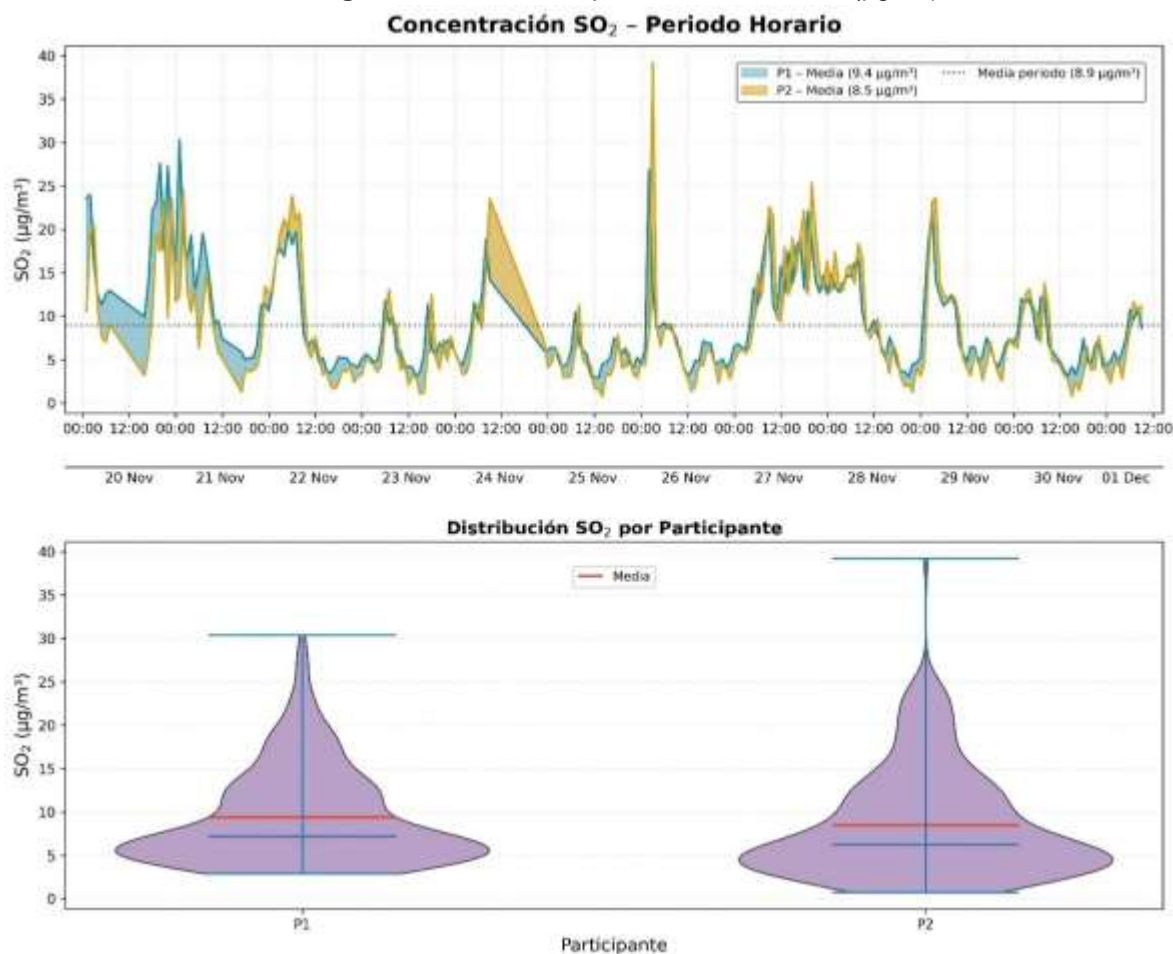
8.3. Dióxido de azufre (SO₂)

Para SO₂, los resultados mostraron comportamiento técnicamente consistente entre participantes, especialmente cuando las concentraciones ambientales se mantuvieron dentro de rangos moderados y con estabilidad operativa de los analizadores.

Debido a que este contaminante suele presentarse en concentraciones relativamente bajas en ambientes urbanos, pequeñas diferencias instrumentales pueden reflejarse de manera proporcionalmente mayor en los indicadores estadísticos. Aun así, se observó capacidad adecuada para seguimiento de tendencia y respuesta comparable entre equipos.

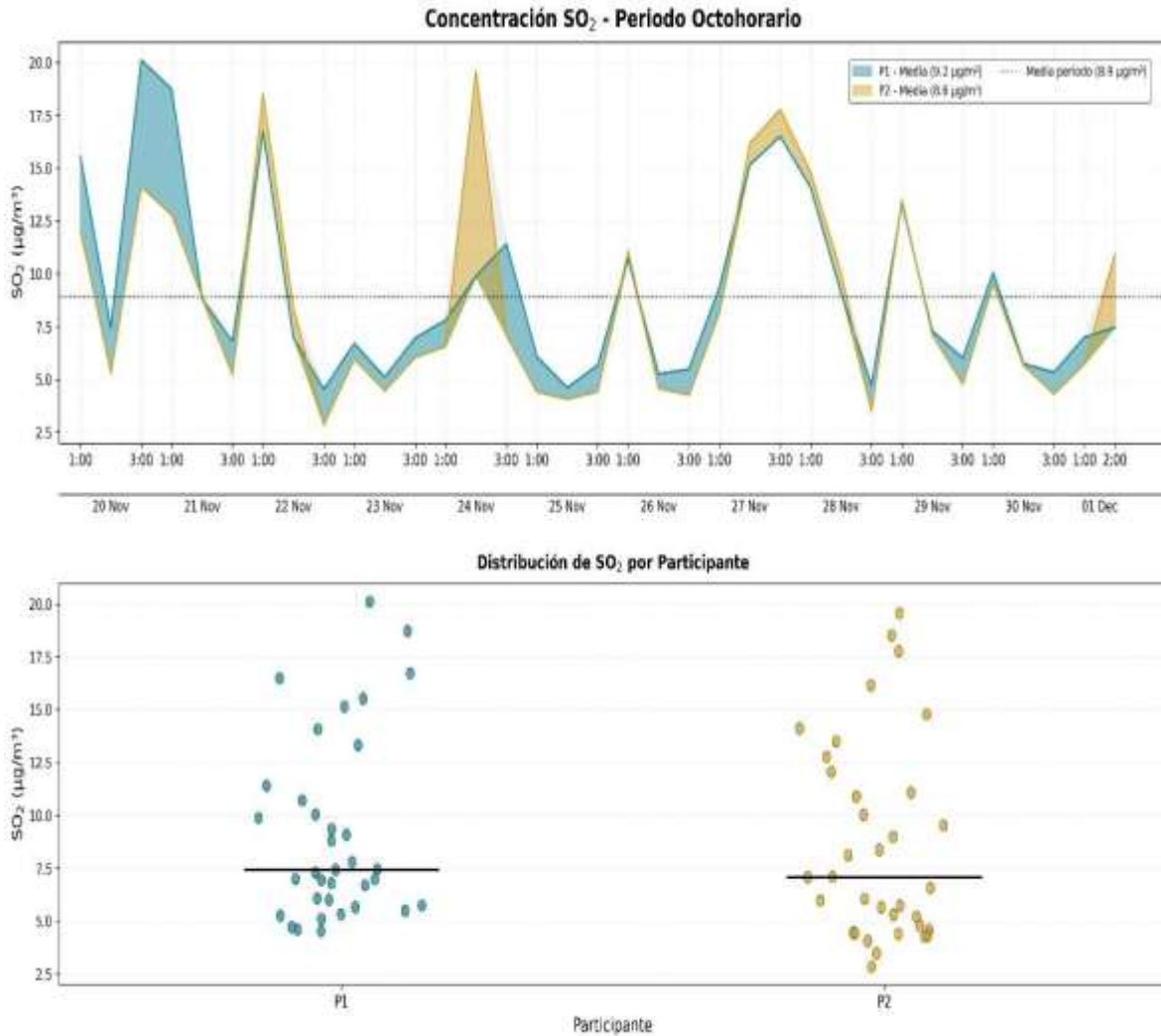
Las discrepancias identificadas podrían asociarse a ajustes de cero, sensibilidad analítica o condiciones de calibración. Se recomienda mantener especial atención en verificaciones de línea base y estándares trazables de calibración.

Figura 7. Serie de tiempo media horaria SO₂ (µg/m³)



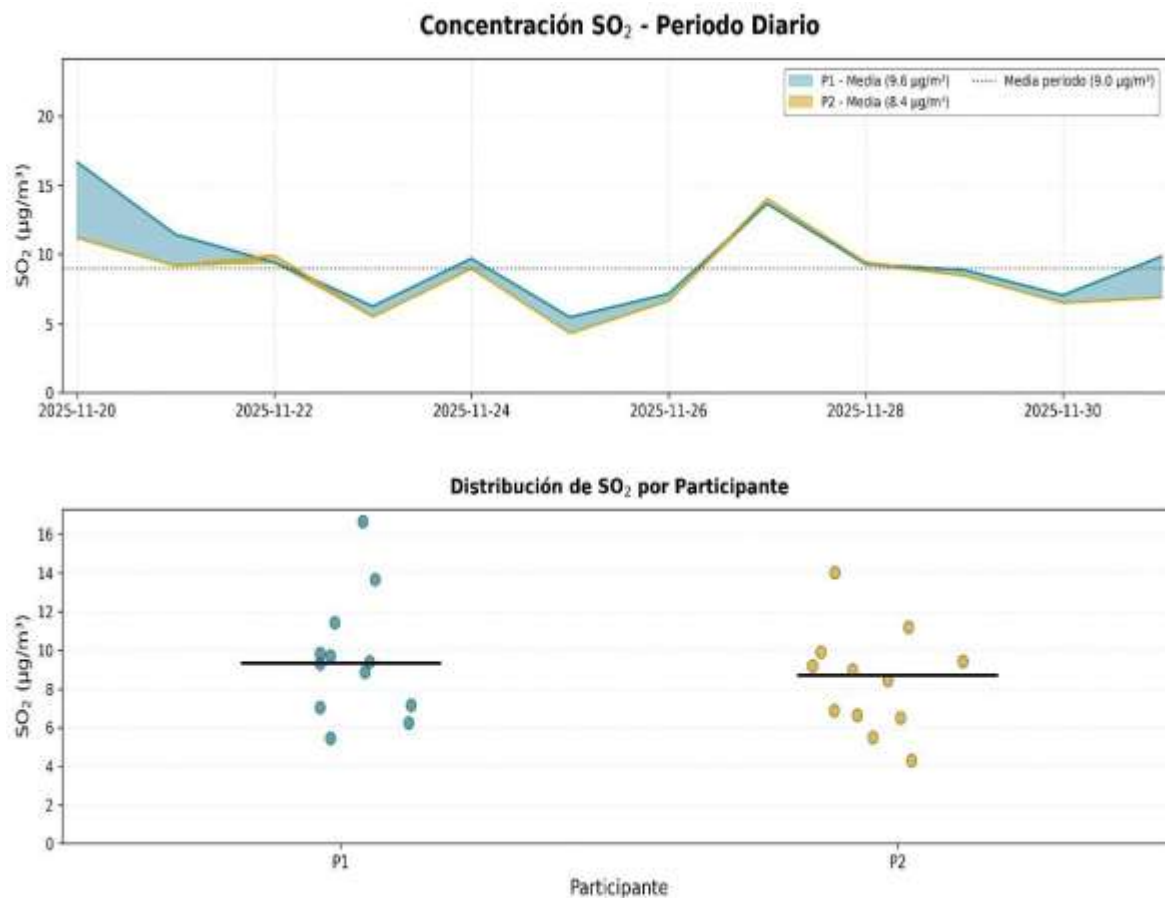
Fuente: Elaboración (Grupo GHYGM), 2026

Figura 8. Serie de tiempo media octohoraria SO₂ (µg/m³)



Fuente: Elaboración (Grupo GHYGAM), 2026

Figura 9. Serie de tiempo media diaria (24 horas) SO₂ (µg/m³)



Fuente: Elaboración (Grupo GHYGAM), 2026

El análisis comparativo entre los tres niveles de agregación muestra una tendencia clara: al incrementarse el grado de agrupamiento temporal, disminuye la presencia de valores extremos y se logra una mejor aproximación al supuesto de normalidad. En este sentido, el promedio diario constituye un nivel adecuado, en el que los picos horarios se reducen de forma notable y el comportamiento estadístico de las distribuciones mejora, aun cuando se pierde parte de la información relacionada con la variabilidad intradiaria.

En SO₂, donde suelen presentarse concentraciones ambientales bajas, pequeñas desviaciones entre equipos pueden generar diferencias estadísticas aparentes. La interpretación adecuada requiere considerar límites de detección, estabilidad de cero y calidad de calibración. En este contexto, los resultados fueron consistentes con un desempeño aceptable del sistema analítico.

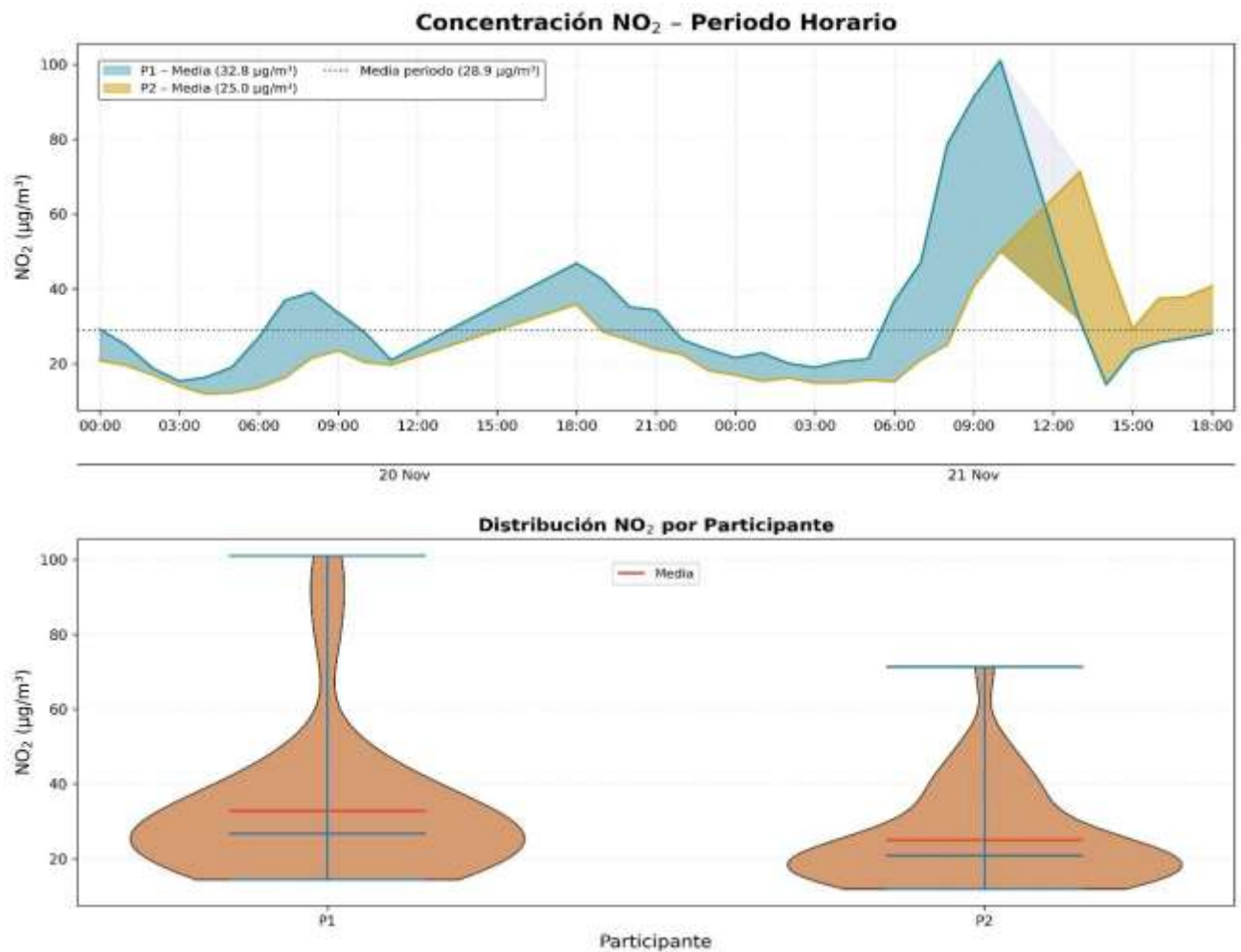
8.4. Dióxido de nitrógeno (NO₂)

El análisis para NO₂ mostró resultados favorables en términos de seguimiento temporal y consistencia entre participantes, con respuesta adecuada frente a variaciones diarias asociadas al tráfico vehicular y ciclos atmosféricos urbanos.

Al tratarse de equipos basados comúnmente en quimioluminiscencia, la comparabilidad depende en gran medida del estado del convertidor, mantenimiento del sistema óptico y control de interferencias. Las diferencias observadas entre participantes podrían estar relacionadas con estos factores más que con fallas estructurales del método.

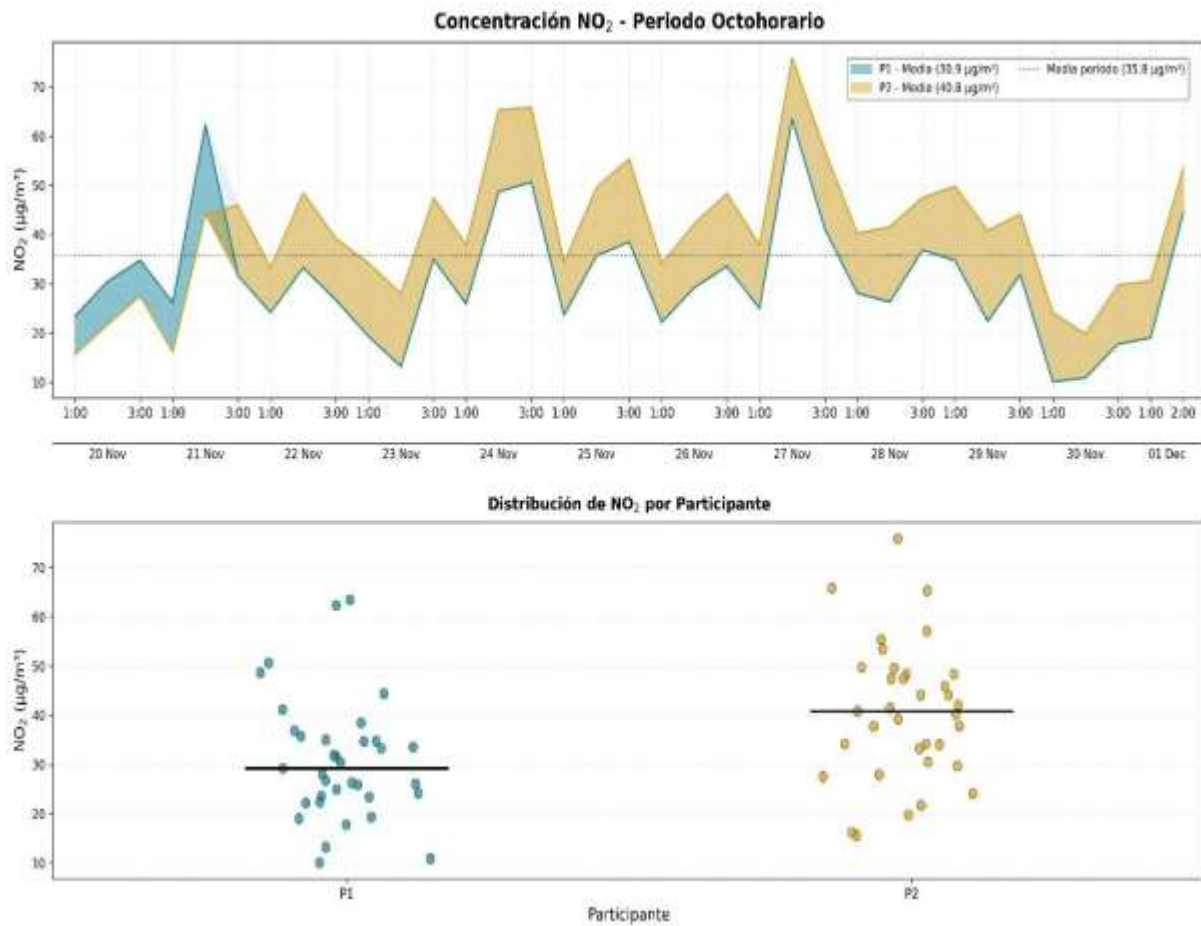
En términos generales, el desempeño para NO₂ fue satisfactorio, evidenciando capacidad comparable de medición bajo condiciones reales de operación.

Figura 10. Serie de tiempo media horaria NO₂ (µg/m³)



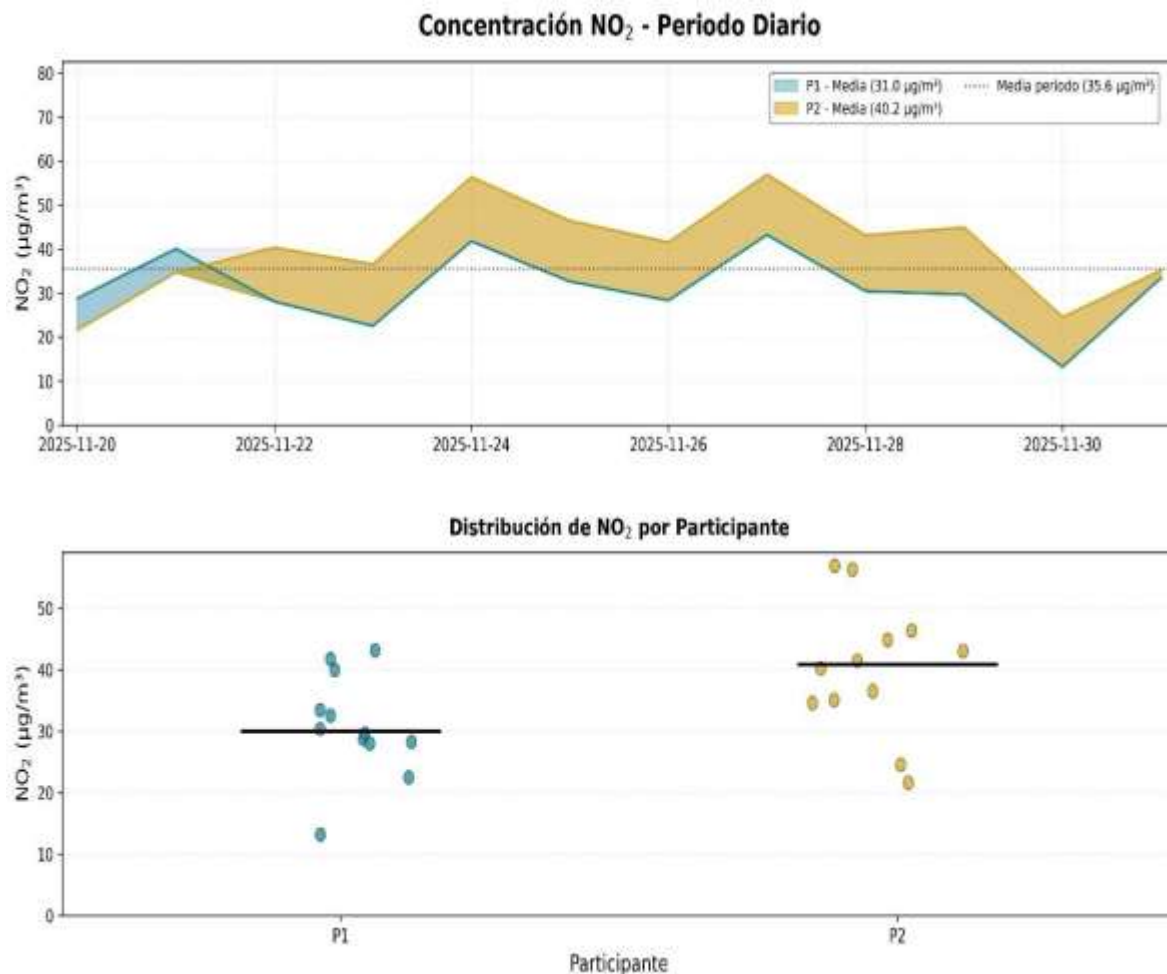
Fuente: Elaboración (Grupo GHYGM), 2026

Figura 11. Serie de tiempo media octohoraria NO₂ (µg/m³)



Fuente: Elaboración (Grupo GHYGAM), 2026


Figura 12. Serie de tiempo media diaria (24 horas) NO₂ (µg/m³)



Fuente: Elaboración (Grupo GHYGM), 2026

El análisis comparativo entre los tres niveles de agregación muestra una tendencia clara: al incrementarse el grado de agrupamiento temporal, disminuye la presencia de valores extremos y se logra una mejor aproximación al supuesto de normalidad. En este sentido, los promedios octohorario y diario constituyen un nivel adecuado, en el que los picos horarios se reducen de forma notable y el comportamiento estadístico de las distribuciones mejora, aun cuando se pierde parte de la información relacionada con la variabilidad intradiaria.

Los resultados de NO₂ reflejaron buena capacidad de seguimiento frente a patrones urbanos asociados a emisiones vehiculares. Las diferencias observadas podrían relacionarse con mantenimiento del convertidor catalítico, eficiencia óptica o interferencias químicas menores. No se evidencian comportamientos que comprometen de forma general la confiabilidad del monitoreo.

	METROLOGIA, MONITOREO Y MODELACIÓN	
	Informe Prueba Interlaboratorio	
	Código: PA10-PR03-M13	Versión: 1

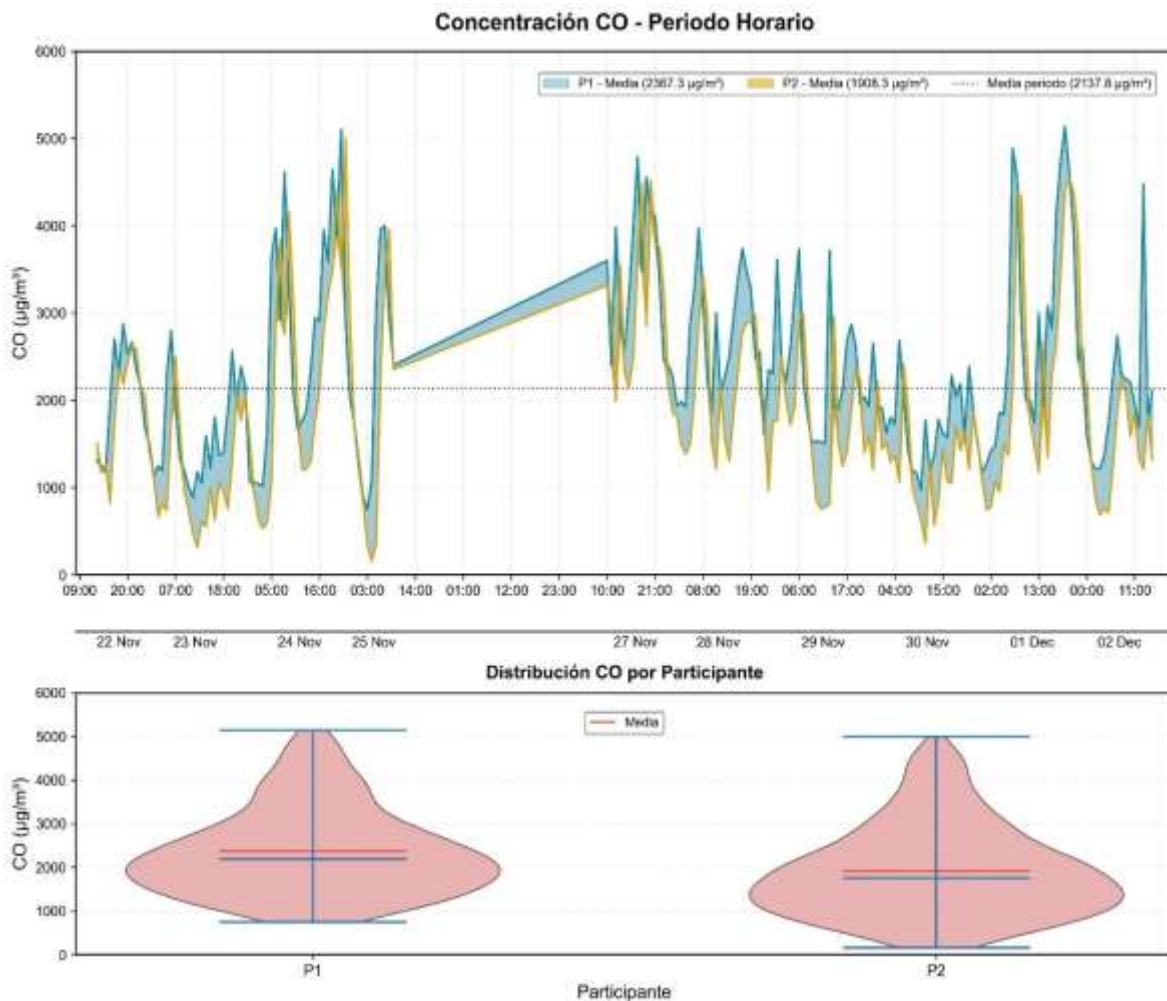
8.5. Monóxido de carbono (CO)

Para CO se observaron buenos niveles de asociación entre resultados reportados por los participantes, con comportamiento estable y baja dispersión relativa en comparación con otros contaminantes evaluados. Los equipos respondieron de manera coherente a las variaciones temporales registradas durante la campaña.

Las diferencias detectadas fueron menores y compatibles con ajustes normales de calibración, incertidumbre instrumental y resolución de lectura. Esto sugiere condiciones favorables de operación y adecuada robustez del método empleado para este contaminante.

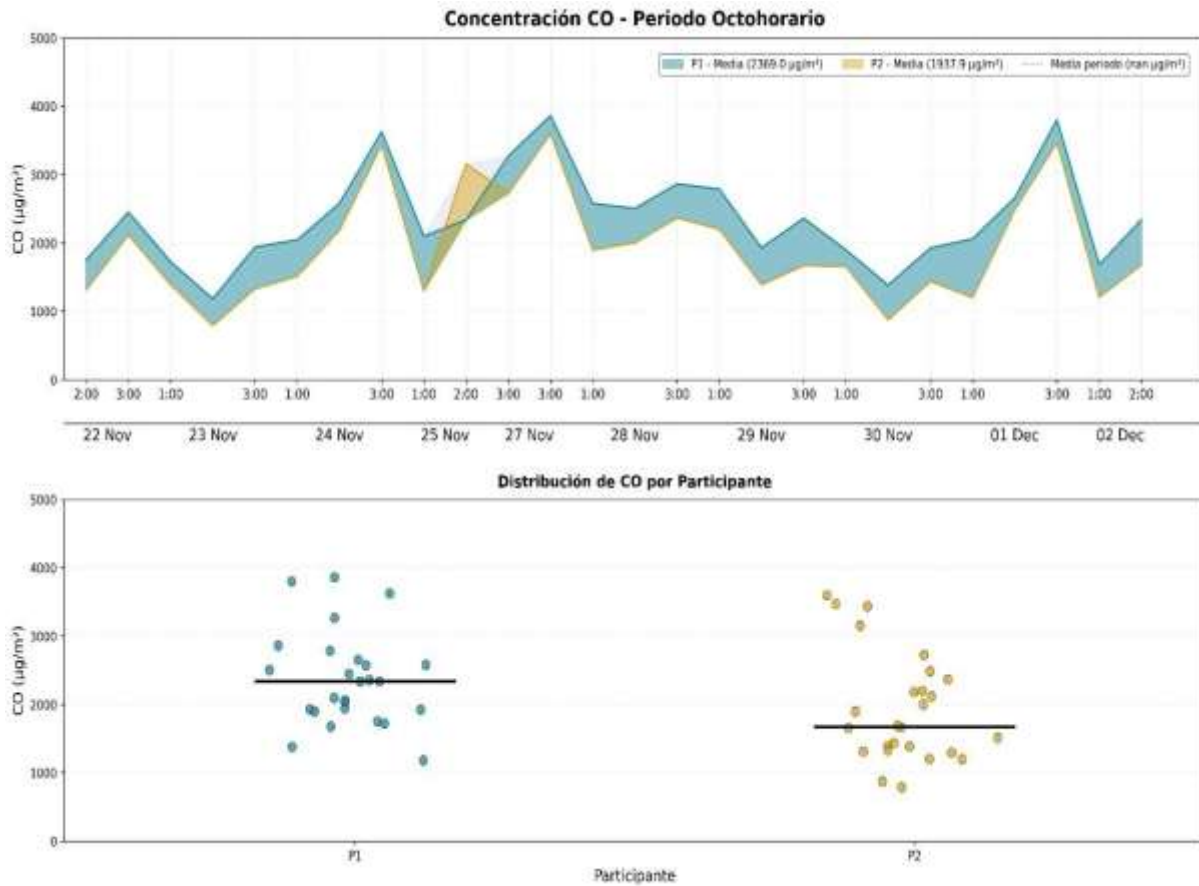
El resultado global para CO fue positivo, con comparabilidad satisfactoria entre los sistemas participantes.

Figura 13. Serie de tiempo media horaria CO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)



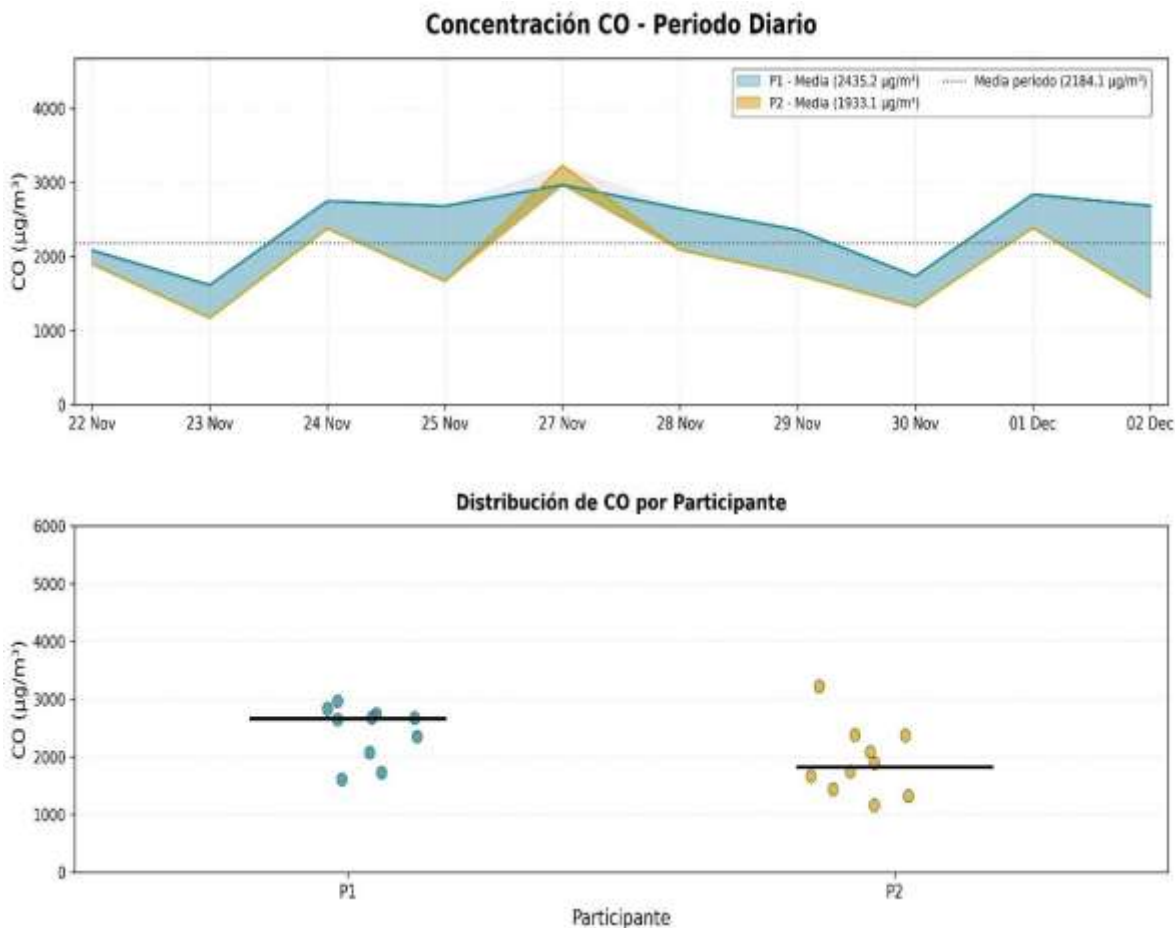
Fuente: Elaboración (Grupo GHYAM), 2026

Figura 14. Serie de tiempo media octohoraria CO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)



Fuente: Elaboración (Grupo GHYAM), 2026


Figura 15. Serie de tiempo media diaria (24 horas) CO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)



Fuente: Elaboración (Grupo GHYAM), 2026

En conjunto, estos resultados confirman que la agregación temporal ejerce un efecto estabilizador sobre la distribución de los datos, favoreciendo el cumplimiento de los supuestos de normalidad en los niveles de mayor agrupamiento. En consecuencia, el nivel diario proporciona las condiciones más adecuadas para la aplicación e interpretación de los métodos estadísticos paramétricos utilizados en la evaluación de la comparabilidad entre participantes.

CO presentó uno de los comportamientos más estables del ensayo, con baja dispersión relativa y buena concordancia entre participantes. Esto sugiere condiciones instrumentales favorables y robustez del método empleado para este contaminante

	METROLOGIA, MONITOREO Y MODELACIÓN	
	Informe Prueba Interlaboratorio	
	Código: PA10-PR03-M13	Versión: 1

9. Análisis estadístico de los resultados

Para el análisis de resultados se realizó la evaluación de la comparabilidad entre sistemas de medición de calidad del aire que constituyó un componente esencial para garantizar la confiabilidad, trazabilidad y validez de la información utilizada en la gestión ambiental y en la toma de decisiones regulatorias. En este contexto, el presente documento desarrolla un análisis integrado de la comparabilidad de contaminantes criterio entre los participantes P1, P2 y P3, a partir de un Ensayo de Comparación Interlaboratorio (CIL), realizado bajo condiciones de co-ubicación y siguiendo los lineamientos definidos en el PT-02-03 Protocolo Documentado.

La evaluación combinó criterios metrológicos, operativos y estadísticos con el fin de determinar si los participantes medían de manera equivalente, si existían discrepancias sistemáticas y si las diferencias observadas eran atribuibles a variabilidad instrumental, condiciones ambientales o factores operativos. Para ello, se aplicaron indicadores complementarios que permitieron evaluar la coherencia temporal (correlación de Pearson y Spearman), consistencia entre mediciones (coeficiente de correlación intraclase CCI), presencia de sesgos sistemáticos (regresión Deming), grado de acuerdo (Bland–Altman) e integridad estadística de los datos (pruebas de Grubbs y Cochran).


Este enfoque multidimensional permitió no solo identificar el nivel de comparabilidad entre los participantes, sino también inferir sobre las causas técnicas de las discrepancias y orientar las recomendaciones. Los resultados obtenidos constituyen una base sólida para fortalecer la calidad de las mediciones, optimizar los procesos de control metrológico y asegurar la confiabilidad de la información reportada por las redes de monitoreo de calidad del aire.

Los indicadores estadísticos en el Ensayo CIL muestran patrones claros de desempeño entre los participantes y de manera integrada con los resultados de incertidumbre y trazabilidad metrológica, permiten explicar por qué se observan las discrepancias, qué factores instrumentales las originan y cómo deben interpretarse metrológicamente.

A continuación, se presenta la evaluación de la comparabilidad integrada para cada contaminante criterio incluido en el Ensayo CIL, basado en el análisis desarrollado y los siguientes criterios de aceptación e interpretación para la declaratoria del grado de comparabilidad integrada.

La evaluación de comparabilidad integrada se presenta de acuerdo con los siguientes criterios:

- Indicadores estadísticos de comparabilidad (CCI, Deming, Bland–Altman).
- Resultados de incertidumbre (prueba F).
- Resultados de confirmación metrológica (Anexo M).
- Declaración integrada de comparabilidad

	METROLOGIA, MONITOREO Y MODELACIÓN	
	Informe Prueba Interlaboratorio	
	Código: PA10-PR03-M13	Versión: 1

9.1. Evaluación de la comparabilidad PM_{2.5}

A partir de los resultados del Ensayo CIL para el contaminante criterio PM_{2.5} presentados, en la tabla 3, se presenta la evaluación de la comparabilidad integrada entre los pares de participantes P1 vs P2, P1 vs P3 y P2 vs P3.

Tabla 3. Declaración integrada de comparabilidad PM_{2.5} (parámetros estadísticos, incertidumbre y metrología)

Criterio de evaluación	P1 vs P2	P1 vs P3	P2 vs P3
Consistencia (CCI)	Alta en 8 h; moderada en 1 h y 24 h; desempeño estable	Moderada en todas las escalas; afectada por variabilidad de P3	Moderada en todas las escalas; afectada por P3
Regresión Deming – 1 h	Sin sesgos sistemáticos	Sesgo constante y proporcional	Sesgo proporcional
Regresión Deming – 8 h	Sin sesgos sistemáticos	Sesgo constante y proporcional	Sesgo constante
Regresión Deming – 24 h	Concordancia total; sin sesgos	Sin sesgos, pero consistencia moderada	Sesgo persistente, aunque reducido
Bland–Altman	Buen acuerdo en todas las escalas; excelente en 24 h	Sesgos persistentes en 1 h y 8 h; reducidos en 24 h	Sesgos persistentes en todas las escalas; reducidos en 24 h
Incertidumbre (Prueba F)	P1 significativamente mayor que P2 (F = 1310–1453)	P1 significativamente mayor que P3 (F = 227–252)	P3 significativamente mayor que P2 (F = 5.75–5.84)
Impacto metrológico (Anexo M)	Trazabilidad completa en P2; P1 con trazabilidad incompleta pero sin sesgos detectables frente a P2	Membrana ABS de P3 (0.818) genera subestimación sistemática y mayor dispersión	Membrana ABS de P3 y variabilidad térmica explican sesgos persistentes
Declaración integrada de comparabilidad	Comparabilidad equivalente	Parcialmente comparables	Parcialmente comparables

Fuente: Elaboración (Grupo GHYGM), 2026

En la tabla 4. se presenta el análisis e influencia de los parámetros de incertidumbre y trazabilidad metrológica en los resultados de la comparabilidad integrada para el contaminante criterio PM_{2.5}.


	METROLOGIA, MONITOREO Y MODELACIÓN	
	Informe Prueba Interlaboratorio	
	Código: PA10-PR03-M13	Versión: 1


Tabla 4. Análisis de la incertidumbre y trazabilidad metrológica en la comparabilidad integrada $PM_{2.5}$

Factor	Análisis e influencia
Incertidumbre	<p>-P1 presenta incertidumbres significativamente mayores que P2 y P3 en todas las escalas temporales.</p> <p>-Los valores de F calculados superaron ampliamente el F crítico (1,483), confirmando que la incertidumbre reportada por P1 fue significativamente mayor.</p> <p>-La incertidumbre mayor de P1 explica por qué, aunque estadísticamente P1 y P2 son equivalentes, P1 muestra mayor dispersión en niveles horarios.</p> <p>-La incertidumbre mayor de P3 frente a P2 explica los sesgos persistentes en P2 vs P3.</p> <p>-La incertidumbre elevada de P1 y P3 sugiere que sus estimaciones incluyen más componentes o mayor variabilidad instrumental</p>
Trazabilidad metrológica	<p>-El valor de membrana de referencia para P3 (0.818) fue superior al de P1 (0.778) y P2 (0.776). Este valor puede generar una subestimación sistemática de PM_{2.5} en P3 amplificando la respuesta beta y aumentando la variabilidad. Esta característica permite explicar lo siguiente:</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ El sesgo proporcional observado en P1 vs P3 y P2 vs P3. ○ La mayor dispersión horaria de P3 (DS = 11.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y valores extremos de 108 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). ○ La heterocedasticidad detectada en los análisis estadísticos <p>-El incumplimiento de la variable de temperatura en los patrones de referencia generó:</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Variabilidad adicional en P3. ○ Moderada consistencia en P2 vs P3. ○ Persistencia de sesgos en todas las escalas <p>-La ausencia de información del participante P1 sobre los patrones de referencia implicó:</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Incertidumbre elevada de P1. ○ Variabilidad horaria.

Fuente: Elaboración (Grupo GHYGM), 2026

La integración de los hallazgos basados en los parámetros estadísticos, incertidumbre y trazabilidad permitió identificar que:

- Las discrepancias observadas no son aleatorias.
- Se originan diferencias reales de calibración, patrones, membranas y control térmico.
- La escala diaria es la más robusta para comparabilidad interlaboratorio.
- La escala octohoraria es la mejor para análisis técnico.
- La escala horaria es la más sensible a variabilidad instrumental.

	METROLOGÍA, MONITOREO Y MODELACIÓN	
	Informe Prueba Interlaboratorio	
	Código: PA10-PR03-M13	Versión: 1

En conclusión, los resultados del Ensayo CIL para PM_{2.5} muestran un comportamiento plenamente consistente con la literatura internacional sobre comparabilidad de monitores BAM 1020/1022 y equipos ópticos: alta coherencia temporal, sesgos sistemáticos dependientes del instrumento y de las condiciones ambientales, y una clara mejora del acuerdo al aumentar la escala temporal de agregación. En este contexto, la combinación de análisis estadístico avanzado (CCI, regresión Deming, Bland–Altman) con la revisión de variables operativas y metrológicas se consolida como requisito indispensable para garantizar la equivalencia de las mediciones entre laboratorios y la confiabilidad de la información utilizada en la gestión de la calidad del aire.


9.2. Evaluación de la comparabilidad PM₁₀

A partir de los resultados del Ensayo CIL para el contaminante criterio PM₁₀, en la tabla 5, se presenta la evaluación de la comparabilidad integrada entre los pares participantes P1 vs P2, P1 vs P3 y P2 vs P3.

Tabla 5. Declaración integrada de comparabilidad PM₁₀ (parámetros estadísticos, incertidumbre y metrología)

Criterio de evaluación	P1 vs P2	P1 vs P3	P2 vs P3
Consistencia (CCI)	Alta en 8 h y 24 h; moderada en 1 h	Moderada en 1 h y 8 h; aceptable en 24 h	Moderada en todas las escalas
Regresión Deming – 1 h	Sin sesgos sistemáticos	Sesgo proporcional	Sesgo proporcional
Regresión Deming – 8 h	Sin sesgos sistemáticos	Sesgo constante	Sesgo constante
Regresión Deming – 24 h	Concordancia total; sin sesgos	Sesgo reducido pero persistente	Sesgo persistente
Bland–Altman	Buen acuerdo; excelente en 24 h	Sesgos persistentes en 1 h y 8 h; reducidos en 24 h	Sesgos persistentes en todas las escalas
Incetidumbre (Prueba F)	P1 >> P2 (F = 540–551) (>> 1.483).	P1 >> P3 (F = 40–42) (>> 1.483).	P3 >> P2 (F = 13.0–13.2) (>> 1.483).
Impacto metrológico (Anexo M)	P2 con trazabilidad completa; P1 con trazabilidad incompleta, pero sin sesgos frente a P2	P3 con mayor ABS y problemas térmicos → subestimación y variabilidad	P3 con mayor ABS y errores térmicos → sesgos persistentes
Declaración global Comparabilidad	Comparabilidad equivalente	Parcialmente comparables	Parcialmente comparables

Fuente: Elaboración Propia. Grupo GHYGAM, 2026

	METROLOGIA, MONITOREO Y MODELACIÓN	
	Informe Prueba Interlaboratorio	
	Código: PA10-PR03-M13	Versión: 1

En la tabla 5. se presenta el análisis e influencia de los parámetros de incertidumbre y trazabilidad metrológica en los resultados de la comparabilidad integrada para el contaminante criterio PM₁₀.


Tabla 6. Análisis de la incertidumbre y trazabilidad metrológica en la comparabilidad integrada PM₁₀.

Factor	Análisis e influencia
Incertidumbre	<ul style="list-style-type: none"> -La incertidumbre elevada de P1 explica su mayor dispersión en escalas horarias, aunque no genera sesgos frente a P2. -La incertidumbre mayor de P3 frente a P2 coincide con los sesgos persistentes observados en Deming y Bland–Altman. -La diferencia de incertidumbre confirma que las discrepancias no son aleatorias, sino metrológicamente significativas.
Trazabilidad metrológica	<ul style="list-style-type: none"> -La ausencia de información del participante P1 sobre los patrones de referencia afectó: <ul style="list-style-type: none"> ○ Correcciones de flujo ○ Correcciones ambientales ○ Estabilidad térmica ○ Variabilidad horaria -El incumplimiento de la exactitud del termómetro en P2 y P3 afectó: <ul style="list-style-type: none"> ○ Corrección del flujo volumétrico ○ Control térmico del cabezal ○ Estabilidad del sistema BAM ○ P3 con mayor incertidumbre frente a P2 ○ Persistencia de sesgos en todas las escalas en P3 -Las diferencias en la membrana ABS influyó en: <ul style="list-style-type: none"> ○ P3 presenta el valor más alto de ABS → mayor subestimación sistemática. ○ Esto explica parte del sesgo proporcional observado en P1 vs P3 y P2 vs P3.

Fuente: Elaboración Propia. Grupo GHYGAM, 2026

La integración de los hallazgos basados en los parámetros estadísticos, incertidumbre y trazabilidad permitió identificar que:

- P1 y P2 son plenamente comparables, con alta consistencia, ausencia de sesgos y excelente acuerdo en 24 h.
- P3 presenta variabilidad adicional, asociada a:
 - Mayor incertidumbre,
 - Problemas de exactitud térmica,

	METROLOGIA, MONITOREO Y MODELACIÓN	
	Informe Prueba Interlaboratorio	
	Código: PA10-PR03-M13	Versión: 1

- Valor elevado de membrana ABS
- Trazabilidad incompleta en patrones críticos.
- P1 vs P3 y P2 vs P3 son solo parcialmente comparables, con sesgos persistentes en todas las escalas.
- La escala diaria (24 h) es la más robusta para comparabilidad interlaboratorio.
- La escala octohoraria (8 h) es la mejor para análisis técnico.
- La escala horaria (1 h) es la más sensible a variabilidad instrumental y metrológica.

9.3. Evaluación de la comparabilidad SO₂ en el Ensayo CIL

A partir de los resultados del Ensayo CIL para el contaminante criterio SO₂ presentados en la tabla 7, se presenta la evaluación de la comparabilidad integrada entre los pares participantes P1 y P2.

Tabla 7. Declaración integrada de comparabilidad SO₂ (parámetros estadísticos, incertidumbre y metrología)

Criterio de evaluación	P1 vs P2
Consistencia (CCI)	Buena en 1 h, 8 h y 24 h; afectada por heterocedasticidad
Regresión Deming – 1 h	Errores sistemáticos y proporcionales
Regresión Deming – 8 h	Sin sesgos sistemáticos; persiste heterocedasticidad
Regresión Deming – 24 h	Sin sesgos sistemáticos; residuos no completamente normales
Bland–Altman	Amplia dispersión en 1 h; mejor acuerdo en 8 h y 24 h
Incertidumbre (Prueba F)	P1 >> P2 (F = 54–56) (>> 1.483).
Impacto metrológico (Anexo M)	P1 no reporta gas patrón ni calibrador por dilución; mayor sensibilidad térmica
Declaración global de comparabilidad	Parcialmente comparables

Fuente: Elaboración (Grupo GHYAM), 2026

En la tabla 8. se presenta el análisis e influencia de los parámetros de incertidumbre y trazabilidad metrológica en los resultados de la comparabilidad integrada para el contaminante criterio SO₂.


	METROLOGIA, MONITOREO Y MODELACIÓN	
	Informe Prueba Interlaboratorio	
	Código: PA10-PR03-M13	Versión: 1


Tabla 8. Análisis de la incertidumbre y trazabilidad metrológica en la comparabilidad integrada SO₂.

Factor	Análisis e influencia
Incertidumbre	<ul style="list-style-type: none"> - P1 presenta incertidumbres significativamente mayores que P2 en todas las escalas temporales -La incertidumbre elevada de P1 explica: <ul style="list-style-type: none"> o La dispersión observada en 1 h o La heterocedasticidad persistente, o Los errores sistemáticos detectados en Deming. - Aunque ambos participantes cumplen los límites de incertidumbre de la Directiva (UE) 2024/2881, la diferencia entre ellos es metrológicamente significativa.
Trazabilidad metrológica	<ul style="list-style-type: none"> -La ausencia de información del participante P1 sobre los patrones de referencia ocasionó: <ul style="list-style-type: none"> o Imposibilidad de verificar la cadena de trazabilidad metrológica o Riesgo de desplazamientos del cero. o Mayor variabilidad en niveles bajos. o Incremento de la incertidumbre total. -La influencia crítica de la temperatura en analizadores UV de SO₂ genero efectos como: <ul style="list-style-type: none"> o Eficiencia de fluorescencia UV o Estabilidad del sistema óptico o Intensidad de la fuente UV o La deriva del cero o Transmisión de radiación UV en presencia de humedad. Estos efectos generaron consecuencias validadas: <ul style="list-style-type: none"> o Amplia dispersión en 1 h, o Heterocedasticidad persistente, o Mejora significativa en 8 h y 24 h cuando la temperatura promedio cumple los requisitos.

Fuente: Elaboración (Grupo GHYGM), 2026

La integración de los hallazgos basados en los parámetros estadísticos, incertidumbre y trazabilidad permitió identificar que:

- Existe una correlación alta y consistente entre P1 y P2 en todas las escalas
- La consistencia es buena, pero afectada por heterocedasticidad.
- El acuerdo mejora significativamente en escalas agregadas (8 h y 24 h).
- Persisten sesgos sistemáticos en 1 h, en coherencia con:
 - o Mayor incertidumbre de P1,
 - o Falta de trazabilidad metrológica

	METROLOGIA, MONITOREO Y MODELACIÓN	
	Informe Prueba Interlaboratorio	
	Código: PA10-PR03-M13	Versión: 1

- Sensibilidad térmica del método UV.

8.4. Evaluación de la comparabilidad NO₂ en el Ensayo CIL

A partir de los resultados del Ensayo CIL para el contaminante criterio NO₂ presentados en la tabla 9, se presenta la evaluación de la comparabilidad integrada entre los participantes P1 y P2.

Tabla 9 Declaración integrada de comparabilidad NO₂ (parámetros estadísticos, incertidumbre y metrología) entre participantes P1 vs P2

Criterio de evaluación	P1 vs P2
Consistencia (CCI)	Moderada en 1 h y 24 h; buena en 8 h; heterocedasticidad en 1 h
Regresión Deming – 1 h	Error sistemático y proporcional; no cumple normalidad
Regresión Deming – 8 h	Sin sesgo constante; persiste sesgo proporcional
Regresión Deming – 24 h	Sin sesgo constante; sesgo proporcional
Bland–Altman	Alta dispersión en 1 h; mejor acuerdo en 8 h; estabilidad en 24 h, confirmando sesgo
Incertidumbre (Prueba F)	P1 >> P2 (F = 2.58–2.70) (>> 1.483).
Impacto metrológico (Anexo M)	P1 no reporta gas patrón ni calibrador; sensibilidad térmica del convertidor
Declaración global de comparabilidad	Parcialmente comparables

Fuente: Elaboración (Grupo GHYGAM), 2026

En la tabla 10. se presenta el análisis e influencia de los parámetros de incertidumbre y trazabilidad metrológica en los resultados de la comparabilidad integrada para el contaminante criterio NO₂.



	METROLOGIA, MONITOREO Y MODELACIÓN	
	Informe Prueba Interlaboratorio	
	Código: PA10-PR03-M13	Versión: 1

Tabla 10. Análisis de la incertidumbre y trazabilidad metrológica en la comparabilidad integrada NO₂.

Factor	Análisis e influencia
Incertidumbre	<p>-P1 presenta incertidumbres significativamente mayores que P2 en todas las escalas temporales.</p> <p>-Los resultados de la incertidumbre implicaron:</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Mayor incertidumbre de P1 amplifica la dispersión en 1 h. ○ Diferencia de incertidumbre explica parte del sesgo proporcional observado en Deming. ○ En 8 h y 24 h, aunque la incertidumbre sigue siendo mayor en P1, la agregación temporal reduce su impacto. <p>-Ambos participantes cumplen los límites de incertidumbre de la Directiva (UE) 2024/2881, pero la diferencia entre ellos es metrológicamente significativa.</p>
Trazabilidad metrológica	<p>-La ausencia de información del participante P1 sobre los patrones de referencia ocasionó:</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Imposibilidad de verificar la cadena de trazabilidad metrológica. ○ Riesgo de desplazamientos del cero. ○ Mayor variabilidad en niveles bajos. ○ Incremento de la incertidumbre total. <p>-La medición de NO₂ depende críticamente de:</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ La eficiencia térmica del convertidor NO₂→NO. ○ La estabilidad de la reacción NO + O₃. ○ La ausencia de condensación en líneas de muestreo. ○ La estabilidad térmica del shelter. <p>En consecuencia, de lo anterior, se observaron los siguientes efectos:</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Deriva del cero en condiciones térmicas variables. ○ Sobreestimación o subestimación según la eficiencia del convertidor. ○ Mayor dispersión en 1 h. ○ Mejora significativa en 8 h y 24 h cuando la temperatura promedio cumple los requisitos.

Fuente: Elaboración (Grupo GHYGM), 2026

La integración de los hallazgos basados en los parámetros estadísticos, incertidumbre y trazabilidad permitió identificar que:

	METROLOGÍA, MONITOREO Y MODELACIÓN	
	Informe Prueba Interlaboratorio	
	Código: PA10-PR03-M13	Versión: 1

- Existe correlación alta entre P1 y P2 en todas las escalas.
- La consistencia es buena en 8 h, moderada en 1 h y 24 h.
- El acuerdo mejora significativamente en escalas agregadas.
- Persiste un sesgo proporcional en todos los niveles.
- La mayor incertidumbre de P1 y la falta de trazabilidad metrológica explican las discrepancias.
- La sensibilidad térmica del método de quimioluminiscencia afecta la estabilidad en 1h

9.4. Evaluación de la comparabilidad CO en el Ensayo CIL

A partir de los resultados del Ensayo CIL para el contaminante criterio CO presentados en la tabla 11, se presenta la evaluación de la comparabilidad integrada entre los participantes P1 y P2.

Tabla 11. Declaración integrada de comparabilidad CO (parámetros estadísticos, incertidumbre y metrología)

Criterio de evaluación	P1 vs P2
Consistencia (CCI)	Moderada en 1 h; buena en 8 h y 24 h
Regresión Deming – 1 h	Sesgo proporcional; no cumple normalidad
Regresión Deming – 8 h	Persiste sesgo proporcional
Regresión Deming – 24 h	Sesgo proporcional reducido
Bland–Altman	Alta dispersión en 1 h; mejor acuerdo en 8 h y 24 h
Incertidumbre (Prueba F)	$P2 \gg P1$ ($F = 5.36-5.53$) ($\gg 1.483$).
Impacto metrológico (Anexo M)	P1 sin gas patrón ni calibrador; sensibilidad térmica del analizador NDIR
Declaración global de comparabilidad	Parcialmente comparables

Fuente: Elaboración (Grupo GHYGAM), 2026

En la tabla 12, se presenta el análisis e influencia de los parámetros de incertidumbre y trazabilidad metrológica en los resultados de la comparabilidad integrada para el contaminante criterio CO.


	METROLOGIA, MONITOREO Y MODELACIÓN	
	Informe Prueba Interlaboratorio	
	Código: PA10-PR03-M13	Versión: 1


Tabla 12 Análisis de la incertidumbre y trazabilidad metrológica en la comparabilidad integrada CO

Factor	Análisis e influencia
Incertidumbre	<p>-P2 presenta incertidumbres significativamente mayores que P1 en todas las escalas temporales.</p> <p>-Los resultados de la incertidumbre implicaron:</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ La mayor incertidumbre de P2 amplifica la dispersión observada en 1 h. ○ La diferencia de incertidumbre explica parte del sesgo proporcional detectado en Deming. ○ En 8 h y 24 h, aunque la incertidumbre sigue siendo mayor en P2, la agregación temporal reduce su impacto. <p>Ambos participantes no cumplen los límites de incertidumbre de la Directiva (UE) 2024/2881 para CO, lo que indica que la comparabilidad debe interpretarse con cautela.</p>
Trazabilidad metrológica	<p>-La ausencia de información del participante P1 sobre los patrones de referencia ocasionó:</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Imposibilidad de verificar la cadena de trazabilidad metrológica. ○ Riesgo de desplazamientos del cero ○ Mayor variabilidad en niveles bajos. ○ Incremento de la incertidumbre total. <p>-El método NDIR para CO es sensible a:</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Deriva térmica del detector. ○ Estabilidad de la fuente IR. ○ Humedad en la línea de muestreo. ○ Exactitud del calibrador por dilución. <p>En consecuencia, de lo anterior, se observaron los siguientes efectos:</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Deriva del cero en condiciones térmicas variables ○ Mayor dispersión en 1 h. ○ Mejora significativa en 8 h y 24 h cuando la temperatura promedio cumple los requisitos.

Fuente: Elaboración (Grupo GHYGAM), 2026

La integración de los resultados estadísticos, la incertidumbre y la trazabilidad metrológica permitió identificar que:

- Existe coherencia temporal entre P1 y P2 en todas las escalas.
- La consistencia es moderada en 1 h y buena en 8 h y 24 h.
- El acuerdo mejora significativamente con la agregación temporal.
- Persiste un sesgo proporcional en todos los niveles.

	METROLOGIA, MONITOREO Y MODELACIÓN	
	Informe Prueba Interlaboratorio	
	Código: PA10-PR03-M13	Versión: 1

- La mayor incertidumbre de P2 y la falta de trazabilidad metrológica en P1 explican las discrepancias.
- La sensibilidad térmica del método NDIR afecta la estabilidad en 1 h.

10. Aplicabilidad y contribución a la RMCAB y la SDA


El ejercicio de comparación interlaboratorio realizado aporta de manera directa al cumplimiento del Plan Estratégico de Calidad del Aire 2030, al fortalecer la base técnica y la confiabilidad de la información utilizada para la toma de decisiones en materia de gestión de la calidad del aire. La mejora en la calidad, trazabilidad y consistencia de los datos generados por la Red de Monitoreo permite contar con información robusta y verificable, necesaria para el seguimiento de los objetivos, metas e intervenciones definidas en el Plan, así como para la evaluación de su efectividad a mediano y largo plazo.

Como resultado de este ejercicio, se elaboraron y documentaron los protocolos para la comparación interlaboratorio de métodos equivalentes y/o de referencia utilizados en el monitoreo de contaminantes criterio y de black carbon. Asimismo, se generaron los informes finales de la ejecución de la comparación interlaboratorio de los métodos equivalentes y/o de referencia para el monitoreo de contaminantes criterio de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB), incluyendo monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO₂), dióxido de nitrógeno (NO₂), ozono (O₃), material particulado PM₁₀ y PM_{2.5}, así como el informe final de la comparación interlaboratorio del método para la determinación de la fracción de black carbon (carbono negro). A partir de estos resultados, se logró confirmar un alto grado de comparabilidad entre los participantes de la comparación interlaboratorio, en cada método de medición evaluado.


Los participantes han logrado identificar errores u oportunidades de mejora en la medición de contaminantes en sus respectivos puntos de monitoreo. El fortalecimiento de estos procesos contribuirá a la generación de datos de mayor calidad, lo que permitirá una toma de decisiones más precisa, informada y acorde con la situación real, en coherencia con los lineamientos del Plan Estratégico de Calidad del Aire 2030.

Como principales logros, se pueden enumerar los siguientes:

- Consolidación de un marco teórico y de referencia, estado del arte de las comparaciones interlaboratorio y ensayos de aptitud para métodos de medición de contaminantes criterio y black carbon.

	METROLOGIA, MONITOREO Y MODELACIÓN	
	Informe Prueba Interlaboratorio	
	Código: PA10-PR03-M13	Versión: 1


- Elaboración e implementación de protocolos detallados para la realización de ensayos de comparación interlaboratorio en calidad del aire, los cuales podrán ser adoptados dentro del sistema de gestión documental de la Secretaría Distrital de Ambiente, y permanecerán a posteriori como referencia y de obligatorio cumplimiento cuando se requiera realizar nuevamente este tipo de ensayos interlaboratorio.
- Cumplimiento del requisito de Acreditación en Colombia por parte de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá, relacionado con la realización de comparaciones interlaboratorio, de forma similar para los demás participantes como la red de calidad del aire de Medellín y la red de calidad del aire de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca.
- Un logro principal, consiste en los resultados obtenidos de la comparación interlaboratorio, donde tras un análisis estadístico muy robusto, se logró demostrar y determinar técnicamente que las mediciones realizadas por los participantes tienen un buen desempeño y nivel de comparabilidad, lo cual permite, dar garantía ante la ciudadanía y demás partes interesadas, en que las mediciones que se realizan son altamente confiables, y respaldan de esta forma las decisiones de políticas públicas y de gestión integral en torno a la calidad del aire de la ciudad de Bogotá y los territorios de los demás participantes.
- El ejercicio interlaboratorio realizado, se constituyó como un referente a nivel nacional e inclusive regional, dado que son escasos o no se tienen antecedentes a este grado de detalle y robustez técnica, y la socialización realizada permitió que otras autoridades ambientales y el organismo acreditador IDEAM conocieran el proyecto, y su aplicabilidad.
- Se estrecharon lazos de cooperación interinstitucional entre las redes de monitoreo participantes, lo cual permite a las entidades seguir trabajando en pro de diferentes temáticas comunes.
- Como productos principales del proyecto, están los protocolos de comparación interlaboratorio que como se mencionó son un insumo importante dentro del sistema de gestión de calidad propio, **y se mantendrán en el tiempo**, así como, los informes finales que dan fé y evidencian los resultados obtenidos, y se presentarán como evidencia objetiva en las auditorías de seguimiento a la Acreditación.
- Por último, y no menos importante, los resultados de comparación interlaboratorio del método de medición de Black Carbon, permiten establecer un referente de calidad de los datos, con miras a la elaboración de estudios y publicación de resultados enfocados en este contaminante en particular.

	METROLOGIA, MONITOREO Y MODELACIÓN	
	Informe Prueba Interlaboratorio	
	Código: PA10-PR03-M13	Versión: 1

11. Conclusiones

Los resultados de la evaluación de la comparabilidad del ensayo CIL de contaminantes criterio permitieron concluir que:


- La comparabilidad plena del Ensayo CIL se logró exclusivamente en $PM_{2.5}$ y PM_{10} entre P1 y P2, sustentada en la combinación de consistencia estadística, ausencia de sesgos, excelente acuerdo y un desempeño metrológico adecuado.
- Los contaminantes criterio de SO_2 , NO_2 y CO, presentan comparabilidad parcial, afectada por mayor Incertidumbre (P1 en SO_2 y NO_2 ; P2 en CO), falta de trazabilidad metrológica (gas patrón, calibrador) y Sensibilidad térmica de los métodos UV, NDIR y quimioluminiscencia.
- La escala diaria (24 h) es la más robusta para ensayos de comparabilidad interlaboratorio CIL.
- La escala octohoraria (8 h) es la mejor para análisis técnico.
- La escala horaria (1 h) es la más sensible a variabilidad instrumental y térmica.
- Todas las parejas evaluadas alcanzaron, como mínimo, la condición de comparabilidad parcial y, en el caso de los contaminantes criterio $PM_{2.5}$ y PM_{10} , P1–P2 lograron comparabilidad plena.
- La presencia de comparabilidad parcial en algunos participantes o contaminantes representa un avance significativo en la gestión de la calidad de los datos, dada la evidencia de los sistemas de medición con coherencia temporal suficiente para reflejar adecuadamente las variaciones ambientales, aunque se identifiquen sesgos sistemáticos corregibles.
- Se validó de manera explícita por el análisis estadístico y metrológico, el comportamiento general adecuado de los instrumentos, identificando acciones de mejora en los factores que generan las discrepancias.
- El ensayo CIL permitió mostrar la capacidad de diagnóstico diferenciando las fuentes de error asociadas a causas instrumentales reales y orientadas a medidas específicas de ajuste, fortaleciendo la fiabilidad futura de las mediciones.

	METROLOGIA, MONITOREO Y MODELACIÓN	
	Informe Prueba Interlaboratorio	
	Código: PA10-PR03-M13	Versión: 1

- Las discrepancias observadas no son aleatorias, sino atribuibles a diferencias en patrones y calibraciones, variabilidad térmica, limitantes en las membranas ABS y modelos de incertidumbre aplicados.
- Ningún par de participantes fue declarado No comparable, resultado destacable del ensayo CIL en cuanto a avance en la gestión de la calidad del dato, dado que evidencia como los sistemas de medición conservan coherencia temporal y capacidad de seguimiento de los cambios ambientales; al mismo tiempo, el análisis estadístico integrado, permitió aislar y explicar los factores metrológicos que aún generan diferencias.
- En términos de la gestión de la calidad del aire, se ha logrado un avance tangible en la evaluación de las redes de calidad del aire participantes con bases sólidas para la armonización, priorización de acciones correctivas y la mejora continua, sin partir de escenarios de ruptura (no comparabilidad), fortaleciendo la confiabilidad y la trazabilidad de los datos reportados.


En el análisis de la declaración integrada de la comparabilidad entre participantes se concluye que:

1. P1 y P2 son plenamente comparables para $PM_{2.5}$ y PM_{10} , y parcialmente comparables para SO_2 , NO_2 y CO .
2. P3 presenta limitaciones metrológicas significativas (ABS, control térmico, incertidumbre), lo que reduce su comparabilidad frente a P1 y P2 en $PM_{2.5}$ y PM_{10} .
3. Las discrepancias observadas no son aleatorias: se explican por diferencias reales en calibración, membranas, condiciones térmicas, trazabilidad y variabilidad instrumental.
4. La escala diaria (24 h) es la más robusta para comparabilidad interlaboratorio; la escala octohoraria (8 h) es óptima para análisis técnico; la escala horaria (1 h) es la más sensible a variabilidad instrumental.
5. La integración de estadística, incertidumbre y trazabilidad constituye un enfoque indispensable para garantizar la equivalencia metrológica entre redes y la confiabilidad de la información utilizada en la gestión de la calidad del aire.

	METROLOGIA, MONITOREO Y MODELACIÓN	
	Informe Prueba Interlaboratorio	
	Código: PA10-PR03-M13	Versión: 1

12. Bibliografía

- Aas, W., Schaug, J., & Hanssen, J. E. (2007). Field Intercomparison of Main Components in Air in EMEP. *Water, Air, & Soil Pollution: Focus*, 7(1–3), 25–31. <https://doi.org/10.1007/s11267-006-9085-7>
- AMVA. (2019, junio). *DISEÑO Y OPERACIÓN DEL SISTEMA DE VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE DEL VALLE DE ABURRÁ*.
- Brunner, J. (2009). Field Intercomparison of Air Quality Measurements in Switzerland. *CHIMIA*, 63(10), 661. <https://doi.org/10.2533/chimia.2009.661>
- Chung, A., Chang, D. P. Y., Kleeman, M. J., Perry, K. D., Cahill, T. A., Dutcher, D., McDougall, E. M., & Stroud, K. (2001). Comparison of Real-Time Instruments Used To Monitor Airborne Particulate Matter. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 51(1), 109–120. <https://doi.org/10.1080/10473289.2001.10464254>
- Dunlea, E. J., Herndon, S. C., Nelson, D. D., Volkamer, R. M., Martini, F. S., Sheehy, P. M., Zahniser, M. S., Shorter, J. H., Wormhoudt, J. C., Lamb, B. K., Allwine, E. J., Gaffney, J. S., Marley, N. A., Grutter, M., Marquez, C., Blanco, S., Cardenas, B., Retama, A., Villegas, C. R. R., ... Molina, M. J. (2007). Evaluation of nitrogen dioxide chemiluminescence monitors in a polluted urban environment. *Atmos. Chem. Phys.*
- ENVEA. (2019a). *TECHNICAL MANUAL AC32e CHEMILUMINESCENT NITROGEN OXYDE ANALYZER*.
- ENVEA. (2019b). *TECHNICAL MANUAL CO12e GAS FILER CORRELATION CARBON MONOXIDE ANALYZER*.
- Environnement S.A. ENVEA. (2019). *MANUAL TECNICO. CO 12e ANALIZADOR DE MONÓXIDO DE CARBONO*.
- EPA U.S. Environmental Protection Agency. (2017). *QA Handbook for Air Pollution Measurement Systems, Volume II: Ambient Air Quality Monitoring Program—Appendix D – Measurement Quality Objectives and Validation Templates Ver. 1*. <https://www.epa.gov>
- EPA U.S. Environmental Protection Agency. (2025). *List of Designated Reference and Equivalent Methods*. <https://www.epa.gov>
- Fried, A., Henry, B., Parrish, D. D., Carpenter, J. R., & Buhr, M. P. (1991). Intercomparison of tunable diode laser and gas filter correlation measurements of ambient carbon monoxide. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, 25(10), 2277–2284. [https://doi.org/10.1016/0960-1686\(91\)90103-E](https://doi.org/10.1016/0960-1686(91)90103-E)

	METROLOGIA, MONITOREO Y MODELACIÓN	
	Informe Prueba Interlaboratorio	
	Código: PA10-PR03-M13	Versión: 1

Herzog, A., Buchmann, B., & Hofer, P. (1998). SYSTEM AND PERFORMANCE AUDIT FOR SURFACE OZONE AND CARBON MONOXIDE GLOBAL GAW STATION USHUAIA ARGENTINA, NOVEMBER 1998. *WMO Global Atmosphere Watch*.

International Organization for Standardization. (2017a). *ISO 21748 Orientación para el uso de estimaciones de repetibilidad, reproducibilidad y veracidad en la evaluación de la incertidumbre de la medición* (Versión 2). ICONTEC.

International Organization for Standardization. (2017b). *NTC-SO/IEC 17025:2017—Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración* (Versión 3). ICONTEC.

International Organization for Standardization. (2023). *ISO/IEC 17043:2023—Evaluación de la conformidad. Requisitos generales para los ensayos de aptitud* (Versión 2). ISO.

ISO 4224:2000—Aire ambiental. Determinación de monóxido de carbono. Método de espectrometría infrarroja no dispersiva. (2000).

ISO 7996:1985—Aire ambiental. Determinación de la concentración másica de óxidos de nitrógeno. Método de quimioluminiscencia. (1985).

ISO 10498:2004—Aire ambiental. Determinación de dióxido de azufre. Método de fluorescencia ultravioleta. (2004).


Koo, T. K., & Li, M. Y. (2016). A Guideline of Selecting and Reporting Intraclass Correlation Coefficients for Reliability Research. *Journal of Chiropractic Medicine*, 15(2), 155–163. <https://doi.org/10.1016/j.jcm.2016.02.012>

Kushwaha, M., Sreekanth, V., Upadhya, A. R., Agrawal, P., Apte, J. S., & Marshall, J. D. (2022). Bias in PM_{2.5} measurements using collocated reference-grade and optical instruments. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(9), 610. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10293-4>

Landis, M. S., & Edgerton, E. S. (2024). Field intercomparison of continuous ambient FRM and FEM NO₂ instruments in the Athabasca Oil Sands Region, Alberta, Canada and the potential impact on ambient regulatory compliance. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 74(1), 11–24. <https://doi.org/10.1080/10962247.2023.2279169>

MAVDT Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial. (2010). *Protocolo para el monitoreo de la Calidad del Aire—Manual de diseño de sistemas de vigilancia de la calidad del aire*.

Met One Instruments. (2016). *BAM 1020 PARTICULATE MONITOR OPERATION MANUAL BAM 1020-9800 REV W*.

	METROLOGÍA, MONITOREO Y MODELACIÓN	
	Informe Prueba Interlaboratorio	
	Código: PA10-PR03-M13	Versión: 1

Met One Instruments. (2022). *BAM 1022 PARTICULATE MONITOR OPERATION MANUAL BAM 1022-9805 REV F*.

Mohtar, Z. A., Yusof, N. F. F., Ramli, N. A., & Yahya, A. S. (2013). Comparison of Particulate Matter (PM₁₀) Monitoring Using Beta Attenuation Monitor (BAM) and Simple Instrument. *International Journal of Engineering and Technology*, 3(3), 358–367.

Ollison, W. M., Crow, W., & Spicer, C. W. (2013). Field testing of new-technology ambient air ozone monitors. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 63(7), 855–863. <https://doi.org/10.1080/10962247.2013.796898>

Parlamento Europeo y del Consejo. (2024). *DIRECTIVA (UE) 2024/2881, sobre la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa*. Diario Oficial de la Unión Europea (DO). https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202402881#page=30.09

Payne, R. B. (1997). Method Comparison: Evaluation of Least Squares, Deming and Passing/Bablok Regression Procedures Using Computer Simulation. *Annals of Clinical Biochemistry*, 34(3), 319–320. <https://doi.org/10.1177/000456329703400317>

Schweizer, D., Cisneros, R., & Shaw, G. (2016). A comparative analysis of temporary and permanent beta attenuation monitors: The importance of understanding data and equipment limitations when creating PM 2.5 air quality health advisories. *Atmospheric Pollution Research*, 7(5), 865–875. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2016.02.003>

Tanimoto, H., Mukai, H., Hashimoto, S., & Norris, J. E. (2006). Intercomparison of ultraviolet photometry and gas-phase titration techniques for ozone reference standards at ambient levels. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D16), 2005JD006983. <https://doi.org/10.1029/2005JD006983>

Tanimoto, H., Sawa, Y., Matsueda, H., Yonemura, S., Wada, A., Mukai, H., Wang, T., Poon, S., Wong, A., Lee, G., Jung, J.-Y., Kim, K.-R., Lee, M., Lin, N.-H., Wang, J.-L., Ou-Yang, C.-F., & Wu, C.-F. (2007). Evaluation of standards and methods for continuous measurements of carbon monoxide at ground-based sites in Asia. *Papers in Meteorology and Geophysics*, 58, 85–93. <https://doi.org/10.2467/mripapers.58.85>


Teledyne API. (2015). *Operation Manual Model T200 NO/NO₂/NO_X Analyzer*.

Teledyne API. (2022a). *User Manual Models T200 and T200U NO/NO₂/NO_X Analyzers*.

Teledyne API. (2022b). *User Manual Model T300, T300M, T300U Carbon Monoxide Analyzers*.

Van de Hulst, H. C. (1981). *Light Scattering by Small Particles*.

Viallon, J., Moussay, P., Esler, M., Wielgosz, R., Bremser, W., Novák, J., Vokoun, M., Botha, A., Rensburg, M. J. V., Zellweger, C., Goldthorp, S., Borowiak, A., Lagler, F., Walden, J., Malgeri,

	METROLOGIA, MONITOREO Y MODELACIÓN	
	Informe Prueba Interlaboratorio	
	Código: PA10-PR03-M13	Versión: 1

E., Sassi, M. P., Gomez, P. M., Patier, R. F., Madruga, D. G., ... Rumyanstev, D. V. (2006). International Comparison CCQM-P28: Ozone at ambient level. *Metrologia*, 43(1A), 08010–08010. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/43/1A/08010>

WHO, C. C. for A. Q. M. and A. P. C. (2003). *European Intercomparison Workshops on Air Quality Monitoring Vol. 5—Measuring of NO, NO2, SO2 and O3*.

Xie, P., Liu, W., Fu, Q., Wang, R., Liu, J., & Wei, Q. (2004). Intercomparison of NO_x, SO₂, O₃, and aromatic hydrocarbons measured by a commercial DOAS system and traditional point monitoring techniques. *Advances in Atmospheric Sciences*, 21(2), 211–219. <https://doi.org/10.1007/BF02915707>

Zellweger, C., Hüglin, C., Klausen, J., Steinbacher, M., Vollmer, M., & Buchmann, B. (2009). Inter-comparison of four different carbon monoxide measurement techniques and evaluation of the long-term carbon monoxide time series of Jungfraujoch. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(11), 3491–3503. <https://doi.org/10.5194/acp-9-3491-2009>

Zellweger, C., Klausen, J., & Buchmann, B. (2005). *SYSTEM AND PERFORMANCE AUDIT FOR SURFACE OZONE AND CARBON MONOXIDE AT THE GLOBAL GAW STATION MT. KENYA KENYA, FEBRUARY 2005*.

FIN DEL INFORME.

CONTROL DE CAMBIOS

Versión	Descripción de la Modificación	No. Acto Administrativo y fecha
1	Adopción.	Radicado 2024IE171818 del 14 de agosto de 2024

RESPONSABLES DE ELABORAR O ACTUALIZAR

Elaboró	Revisó	Aprobó
Nombres: Angela Marcela Gomez Quintero Claudia Lucia Contreras Camacho Jonathan Leandro Morales Cargos: Contratistas Nombre: José Hernán Garavito Calderón Cargo: Funcionario Fecha: 29-04-2024	Nombre: Daniela García Cargo: Subdirectora de Calidad del Aire, Auditiva y Visual Fecha: 02-05-2024 Nombre: Gladys Emilia Rodríguez Pardo Cargo: Directora de Control Ambiental Fecha: 26-07-2024	Nombre: Jerónimo Juan Diego Rodríguez Rodríguez Cargo: Subsecretario General Fecha: 14 de agosto de 2024