



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO



GOBIERNO DE LA  
CIUDAD DE MÉXICO

SECRETARÍA DEL  
MEDIO AMBIENTE

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN,  
CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN

2a

# PROTOCOLO PARA LA EVALUACIÓN DE DISPOSITIVOS BASADOS EN MICROSENSORES

Manual de procedimientos



INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA  
**ATMÓSFERA**  
Y CAMBIO CLIMÁTICO



*30 de Marzo del 2023  
Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático,  
Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)  
Ciudad Universitaria, C.P. 04510, Ciudad de México.*

## **Protocolo para la evaluación de dispositivos basados en microsensores: Manual de procedimientos**

Proyecto: EVALUACIÓN DE DISPOSITIVOS BASADOS EN MICROSENSORES PARA EL  
MONITOREO CONTINUO DE LA CALIDAD DEL AIRE  
SECTEI 190/2021

Armando Retama<sup>1</sup>, Jaime Contreras<sup>1</sup>, Olivia Rivera<sup>2</sup>, Eugenia González<sup>1,3</sup>, Michel Grutter<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)

<sup>2</sup> Dirección de Monitoreo de la Calidad del Aire. Secretaría de Medio Ambiente, Gobierno de la Ciudad de México

<sup>3</sup> Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos, UNAM

\* Responsable técnico del proyecto

## Índice

	<b>Glosario</b>	3
<b>1</b>	<b>ANTECEDENTES</b>	4
1.1	Propósito	
1.2	Alcance	5
1.3	Objetivo	6
1.4	Resumen del método	6
1.5	Salud y seguridad	6
<b>2</b>	<b>PROTOCOLO DE PRUEBA</b>	7
2.1	Descripción de la prueba básica	7
2.2	Materiales y equipo	7
2.2.1	PM2.5	7
2.2.2	Ozono	7
2.3	Selección y configuración del sitio de prueba	8
2.4	Configuración de los dispositivos en el sitio de prueba	10
2.5	Realización de la prueba básica	12
2.5.1	PM2.5	12
2.5.2	Ozono	13
<b>3</b>	<b>MÉTRICAS DE DESEMPEÑO Y CÁLCULOS</b>	15
3.1	PM2.5	
3.1.1	Estimación de los promedios de 24 horas	16
3.1.2	Estimación del promedio del despliegue	16
3.1.3	Precisión	16
3.1.4	Sesgo y linealidad	16
3.1.5	Error	17
3.1.6	Efectos de las condiciones ambientales	17
3.2	Ozono	18
3.2.1	Estimación de los promedios de 1 hora	21
3.2.2	Estimación del promedio del despliegue	21
3.2.3	Precisión	21
3.2.4	Sesgo y linealidad	21
3.2.5	Error	22
3.2.6	Efectos de las condiciones ambientales	22
		23
<b>4</b>	<b>VALORES OBJETIVO</b>	26
<b>5</b>	<b>CONSIDERACIONES FINALES</b>	27

## Glosario

$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Microgramos por metro cúbico
$^{\circ}\text{C}$	Grados Celsius
%HR	Porcentaje de humedad relativa
CENAM	Centro Nacional de Metrología
CO	Monóxido de carbono
CV	Coefficiente de varianza
DE	Desviación estándar
DMCA	Dirección de Monitoreo de la Calidad del Aire
FEM	Siglas en inglés para Método Federal Equivalente de la US EPA
FRM	Siglas en inglés para Método Federal de Referencia de la US EPA
HR	Humedad relativa
O <sub>3</sub>	Ozono
PM <sub>2.5</sub>	Partículas menores a 2.5 micrómetros
POE	Programa de Operación Estándar
ppbv	Partes por billón en volumen
RMSE	Siglas en inglés para error cuadrático medio
NO <sub>2</sub>	Dióxido de nitrógeno
NOM	Norma Oficial Mexicana
NRMSE	Siglas en inglés para error cuadrático medio normalizado
SEMARNAT	Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales
SO <sub>2</sub>	Dióxido de azufre
T	Temperatura ambiente
US EPA	Siglas en inglés para la Agencia de Protección del Ambiente de los Estados Unidos

## 1 ANTECEDENTES

Los sensores de bajo costo con aplicación para la medición de la calidad del aire, son dispositivos electroquímicos, electrónicos u ópticos capaces de generar una respuesta eléctrica cuando se exponen a uno o varios contaminantes, la magnitud de la respuesta es proporcional a la concentración del contaminante en el aire para el cual fueron diseñados. Generalmente son pequeños (microsensores), ligeros y con un costo relativamente bajo, de allí el término de sensores

de bajo costo. Cuando estos elementos sensores se integran junto con otros componentes como parte de un sistema con el hardware y software apropiados, para medir la contaminación del aire, forman un sistema de microsensores (SuS) para el monitoreo de la calidad del aire. A estos sistemas o dispositivos se les conoce también como “dispositivos de microsensores”, “sensores de bajo costo” o “sensores de calidad del aire”.

El avance tecnológico ha permitido el desarrollo de dispositivos cada vez más pequeños y sensibles para medir diferentes contaminantes. Existen en el mercado una gran diversidad de marcas y modelos para medir uno o más contaminantes del aire, son fácilmente accesibles y tienen una amplia gama de precios, configuraciones y tamaños. Su uso empieza a extenderse entre la ciudadanía, las organizaciones de la sociedad civil, los deportistas, estudiantes y recientemente entre los sectores científico y gubernamental.

Se sabe que el desempeño de estos dispositivos es variable y existe poca información objetiva sobre la exactitud, precisión y sensibilidad de las mediciones obtenidas. Diversas agencias en otros países han tomado la iniciativa para su evaluación mediante la comparación contra los instrumentos de grado regulatorio o científico que comúnmente se emplean en el estudio formal de la calidad del aire (por ejemplo, AQ-SPEC<sup>1</sup>, AirParif<sup>2</sup>). El enfoque principal de estas evaluaciones es ofrecer información técnica y objetiva para guiar la selección de los dispositivos para usos en aplicaciones que no requieren de datos de grado regulatorio. Si bien, no existían protocolos estandarizados de prueba, ni objetivos de desempeño para la evaluación de los dispositivos, recientemente la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA, por sus siglas en inglés) ha avanzado en esta dirección proponiendo protocolos para pruebas de desempeño, métricas y valores objetivo para sensores empleados en la medición de partículas finas y ozono.

Empleando estos documentos como guía, este documento pretende contribuir con los procedimientos indispensables para realizar la evaluación de estos dispositivos fomentando un uso apropiado de esta tecnología, avanzar en la obtención de datos con una calidad conocida, impulsar el desarrollo y mejora de los sensores y aplicar mejores prácticas para el uso de los dispositivos y sus datos derivados.

## 1.1 Propósito

El propósito de este documento es presentar una guía para la evaluación de sistemas de microsensores (sensores o dispositivos de bajo costo), utilizando equipos grado regulatorio como referencia, para su uso en aplicaciones de monitoreo informativo y suplementario no-regulatorios en entornos ambientales exteriores y de sitios fijos. Las categorías para este tipo de aplicaciones podrían incluir:

---

<sup>1</sup> *Air Quality Sensor Performance Evaluation Center, South Coast Air Quality Management District*, <http://www.aqmd.gov/aq-spec>.

<sup>2</sup> AIRLAB Microsensor Challenge, AirParif, <https://airparif.shinyapps.io/ChallengeResultsEN/>.

- **El estudio de la variabilidad espaciotemporal:** caracterización de concentración de algún contaminante en un área geográfica y/o tiempo (por ejemplo: tendencias diarias, estudios de gradientes, pronóstico de la calidad del aire, ciencia ciudadana, educación, sensibilización, etc.)
- **Comparaciones:** análisis de diferencias y/o similitudes en las características de la contaminación del aire con respecto a un valor umbral o entre diferentes redes, estaciones, localidades, regiones, períodos de tiempo, etc. (por ejemplo: detección de *hot-spots*, fusión de datos, respuestas a emergencias, monitoreo complementario)
- **Tendencias de largo plazo:** cambio en la concentración de un contaminante durante un período generalmente de varios años (por ejemplo: cambios de largo plazo, estudios epidemiológicos, verificación de modelos de simulación numérica). Para este objetivo una vigilancia periódica y evaluación rigurosa del desempeño de los sensores es imprescindible.

## 1.2 Alcance

Este procedimiento describe las actividades recomendadas para la evaluación del desempeño de los dispositivos basados en microsensores mediante la comparación contra mediciones con equipos de referencia, específicamente para mediciones de contaminantes criterio del aire ambiente en exteriores. Su aplicación permitirá generar información sobre la calidad de los datos que se puedan obtener del uso de estos dispositivos. El procedimiento no incluye la evaluación del desempeño mediante pruebas de laboratorio esto debido a la falta de la infraestructura adecuada (requiere de una cámara de exposición ambiental controlada). No pretende ofrecer una solución única para la evaluación de los dispositivos, ni es específico para las particularidades de los diferentes tipos de dispositivos disponibles comercialmente o en desarrollo. Tampoco promueve el uso de los dispositivos para alguna aplicación en particular, ni pretende promover su uso como una alternativa o complemento al monitoreo de grado regulatorio. Los resultados que se obtengan al seguir este procedimiento no garantiza que el equipo será capaz de generar datos confiables, idénticos o similares a los obtenidos por los equipos de referencia ya que eso dependerá de las características y del sensor que se está evaluando.

*Los resultados de la aplicación de este procedimiento no implican certificación o aprobación alguna por parte del evaluador, pero ofrece la posibilidad de conocer a través de métricas específicas las bondades y limitaciones de los sensores.*

Si bien, el documento hace referencia a la Ciudad de México, su aplicación podría extenderse a cualquier localidad en el país realizando las consideraciones necesarias con respecto a las condiciones climáticas y de calidad del aire particulares.

### 1.3 Objetivo

El principal objetivo del procedimiento es proporcionar un protocolo consistente de prueba, así como una metodología de métricas y recomendaciones para evaluar consistentemente el desempeño de los dispositivos basados en sensores de bajo costo, presentando los resultados de manera consistente.

### 1.4 Resumen del método

Los protocolos descritos en este procedimiento siguen las recomendaciones, métricas y valores objetivo descritas para una prueba básica (o prueba base) en los documentos de la Agencia de Protección del Ambiente de los Estados Unidos (US EPA, por sus siglas en inglés) *Performance Testing Protocols, Metrics, and Target Values for Fine Particulate Matter Air Sensors*<sup>3</sup> y *Performance Testing Protocols, Metrics, and Target Values for Ozone Air Sensors*<sup>4</sup>. Para información detallada sobre las motivaciones, razonamiento y consideraciones técnicas para el desarrollo de estos documentos recomendamos consultarlos directamente. Este procedimiento no pretende reemplazar ni sustituir estos documentos. En este documento se incluyen también algunas consideraciones derivadas de la experiencia de los autores durante el ejercicio de evaluación realizado en la Ciudad de México en 2022.

### 1.5 Salud y seguridad

La ejecución de este procedimiento puede implicar el acceso a instalaciones ubicadas en el techo o alturas mayores, en estos casos se recomienda seguir las recomendaciones de la NOM-009-STPS. En todo momento deberá observar los protocolos y procedimientos de seguridad del sitio en donde se realizará la instalación y donde no existan procedimientos establecidos, aplicar el sentido común y todas las precauciones de prevención de accidentes posibles. Es necesario el uso de calzado anti-derrapante y lentes de seguridad, si considera que permanecerá expuesto a la radiación solar durante un periodo prolongado (>15 minutos), es recomendable utilizar gorra o sombrero, ropa ligera y aplicarse crema o loción con un factor de protección solar  $\geq 35$ .

---

<sup>3</sup> Duvall et al. (2021) **Performance Testing Protocols, Metrics, and Target Values for Fine Particulate Matter Air Sensors Use in Ambient, Outdoor, Fixed Site, Non-Regulatory Supplemental and Informational Monitoring Applications**. US EPA report no. EPA/600/R-20/280, February 2021.

<sup>4</sup> Duvall et al. (2021) **Performance Testing Protocols, Metrics, and Target Values for Ozone Air Sensors Use in Ambient, Outdoor, Fixed Site, Non-Regulatory Supplemental and Informational Monitoring Applications**. US EPA report no. EPA/600/R-20/279, February 2021.

## 2 PROTOCOLO DE PRUEBA

### 2.1 Descripción de la prueba básica

La prueba básica o prueba base involucra evaluaciones de campo al aire libre y brinda información importante sobre el desempeño del sensor, que será relevante para las condiciones del mundo real y permitirá a los usuarios anticipar cómo podrían funcionar en condiciones similares. La prueba consiste en dos implementaciones en campo con tres dispositivos de la misma marca y modelo, ubicados junto a monitores grado regulatorio que cumplan con los estándares de medición de la NOM-156- SEMARNAT-2012 y cuenten con la designación FRM/FEM (*Federal Reference Method/Federal Equivalent Method* de la US EPA), que serán empleados como instrumentos de referencia. En cada implementación se requiere por lo menos 30 días de medición. Los equipos de referencia deben operarse de acuerdo con los protocolos de la Dirección de Monitoreo de la Calidad del Aire (DMCA) o los descritos en la NOM-156-SEMARNAT-2012. Su calibración deberá realizarse con estándares de transferencia certificados y trazables a un estándar primario.

La prueba puede realizarse en un solo sitio de prueba, pero durante dos temporadas diferentes o en dos sitios de prueba con condiciones ambientales distintas. La combinación de las pruebas de campo debe demostrar el desempeño del sensor en un intervalo de condiciones de temperatura, humedad relativa, clima y concentraciones de los contaminantes, similares a las esperadas para los sitios en donde potencialmente se utilizarán los dispositivos.

Las comparaciones deberán realizarse para los promedios de 24 horas para partículas menores a  $2.5 \mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{2.5}$ ) y de una hora para ozono ( $\text{O}_3$ ), sin embargo, si el evaluador lo considera necesario, se pueden aplicar otros periodos de tiempo (por ejemplo, promedios de 8 horas para  $\text{O}_3$ )

### 2.2 Materiales y equipo

#### 2.2.1 $\text{PM}_{2.5}$

- Tres o más dispositivos con sensores para la medición de  $\text{PM}_{2.5}$  de la misma marca, modelo y versión de firmware.
- Monitor grado regulatorio para  $\text{PM}_{2.5}$  calibrado en el sitio de prueba.
- Sensor de humedad relativa calibrado.
- Sensor de temperatura ambiente calibrado.
- Estructuras para el soporte y anclaje de los dispositivos (de acuerdo con lo recomendado por el fabricante).

Si el sitio de prueba cuenta con la infraestructura y capacidades necesarias, se recomienda realizar algunas mediciones adicionales que podrían ser útiles para comprender las razones físicas detrás de las variaciones en el desempeño del sensor y apoyar la interpretación de los resultados. Éstas mediciones pueden incluir: 1) la distribución del tamaño de las partículas, 2) su composición química y 3) el índice de refracción, 4) condiciones meteorológicas y clima.

El tiempo en todos los equipos de medición deben estar alineados, para establecer la hora en los diferentes dispositivos puede utilizar el tiempo de un reloj estándar (por ejemplo, la hora oficial del CENAM [https://www.cenam.mx/hora\\_oficial/](https://www.cenam.mx/hora_oficial/)). Cuando las mediciones se reporten como un promedio, averigüe si la etiqueta de tiempo corresponde al final de la medición o al inicio, esta información debe tenerse en cuenta para la alineación de los datos en el tiempo.

### 2.2.2 Ozono

- Tres o más dispositivos con sensores para O<sub>3</sub> de la misma marca, modelo y versión de firmware.
- Analizador grado regulatorio para O<sub>3</sub> calibrado en el sitio de prueba.
- Sensor de humedad relativa calibrado.
- Sensor de temperatura ambiente calibrado.
- Estructuras para el soporte y anclaje de los dispositivos (según lo recomendado por el fabricante).

Es recomendable realizar mediciones simultáneas de monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) y (SO<sub>2</sub>) con equipos FRM/FEM para evaluar posibles interferencias, además podrían ser útiles para interpretar los resultados de las pruebas de campo.

Las mediciones deben registrarse localmente en cada instrumento o a través de un sistema central de adquisición de datos. Algunos dispositivos requieren de una conexión a internet para la transmisión de datos al repositorio de datos del fabricante. Si está conectado a internet, evite las actualizaciones de firmware durante las mediciones. Indague cualquier transformación que el fabricante aplique sobre los datos.

El tiempo en todos los equipos de medición deben estar alineados, para establecer la hora en los diferentes dispositivos puede utilizar el tiempo de un reloj estándar (por ejemplo, la hora oficial del CENAM [https://www.cenam.mx/hora\\_oficial/](https://www.cenam.mx/hora_oficial/)). Cuando las mediciones se reporten como un promedio, averigüe si la etiqueta de tiempo corresponde al final de la medición o al inicio, esta información deberá tenerse en cuenta para alinear los datos en el tiempo.

## 2.3 Selección y configuración del sitio de prueba

La selección del sitio dependerá del área a la cual se planea destinar los dispositivos, es la intención evaluar el desempeño en una variedad de condiciones de temperatura, humedad y concentración de contaminantes. Por ejemplo, aun cuando el clima en la mayor parte del territorio de la Ciudad de México es templado subhúmedo, en el norte y noreste predominan un clima seco y semiseco, mientras que en la zona montañosa del suroeste domina el clima templado húmedo. Debido a la compleja naturaleza de las partículas en la Ciudad de México, se recomienda incluir dos sitios con diferentes fuentes predominantes de partículas (por ejemplo, fuentes vehiculares, industriales, transformaciones secundarias, etc.). Antes de la prueba se recomienda realizar una inspección de

los datos del sitio candidato (cuando estén disponibles) para confirmar que exista variabilidad en los promedios de 24 horas. La elección de un sitio con escasa variación podría influir en los resultados de las métricas de desempeño.

En el caso de O<sub>3</sub> se recomienda que la prueba básica se realice en dos lugares o, alternativamente, en un mismo sitio pero durante dos temporadas diferentes. La Ciudad de México se caracteriza por registrar altas concentraciones de O<sub>3</sub> durante la mayor parte del año y suelen observarse concentraciones que superan el valor límite de la NOM-020-SSA1-2021 (90 ppb para el promedio de 1 hora) en prácticamente todo su territorio, sin embargo, se sabe que existe una variación espacial importante en los precursores y en los procesos de formación/acumulación del contaminante<sup>5</sup>. Los cambios en el ciclo diurno, con concentraciones cercanas a cero durante las mañanas, y altas concentraciones durante el periodo de mayor actividad fotoquímica, aseguran la variabilidad en las mediciones. Se sabe que algunos sensores electroquímicos para O<sub>3</sub> presentan una sensibilidad cruzada al NO<sub>2</sub>, y para la medición de O<sub>3</sub> utilizan un arreglo con dos sensores electroquímicos, uno para O<sub>3</sub>+NO<sub>2</sub> y otro para NO<sub>2</sub>. La concentración de O<sub>3</sub> se deriva de la diferencia de las mediciones de ambos. Tomando esto en consideración y con el propósito de identificar algún efecto de las variaciones de NO<sub>2</sub> en la medición de O<sub>3</sub>, se recomienda también tomar en cuenta la variabilidad y concentraciones de NO<sub>2</sub> en los sitios de prueba.

Si se decide realizar la comparación en un sitio único, entonces la prueba debe realizarse en dos temporadas diferentes, pero siempre incluyendo la temporada alta de O<sub>3</sub> (15 febrero a 15 de junio en el caso de la Ciudad de México) cuando se presentan las máximas concentraciones del contaminante. Si requiere más información sobre los niveles de contaminación en la Ciudad de México consulte los datos e informes anuales de la calidad del aire el sitio oficial de la Dirección de Monitoreo de la Calidad del Aire<sup>6</sup>.

---

<sup>5</sup> Zavala, M., Brune, W. H., Velasco, E., Retama, A., Cruz-Alavez, L. A., & Molina, L. T. (2020). Changes in ozone production and VOC reactivity in the atmosphere of the Mexico City Metropolitan Area. *Atmospheric Environment*, 238, 117747. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117747>.

<sup>6</sup> <http://www.aire.cdmx.gob.mx/>.

## 2.4 Configuración de los dispositivos en el sitio de prueba

Realice los siguientes pasos durante la configuración de los dispositivos que se emplearán en la prueba básica:

1. Asegúrese que la instalación del equipo de referencia cumpla con las siguientes características:
  - a. La entrada de muestra deberá ubicarse a una altura entre 2 y 15 metros con respecto al nivel del suelo.
  - b. Debe encontrarse a una distancia horizontal y vertical mayor a 1 metro de cualquier estructura de soporte.
  - c. A una distancia mayor a 10 metros de la línea de goteo de árboles que puedan actuar como una obstrucción.
  - d. A una distancia mayor a 10 metros de vialidades secundarias o terciarias, y mayor a 250 metros de vialidades primarias.
  - e. Alejada de salidas de aire, ventiladores, chimeneas y fuentes locales de compuestos orgánicos volátiles y de óxidos de nitrógeno.
  - f. A una distancia mayor a 10 metros de sitios que concentren humedad o estancamiento de agua, por ejemplo, pasto, jardines, fuentes de agua, lagunas.
2. Instale al menos tres dispositivos de microsensores de la misma marca, modelo y versión de firmware. Verifique que la instalación cumpla con las siguientes características:
  - a. Coloque los dispositivos a una distancia no mayor a 20 metros en la horizontal de la entrada de muestra del equipo de referencia.
  - b. Deben estar expuestos a un flujo irrestricto de aire.
  - c. Verifique que la diferencia de altura con respecto a la entrada de la toma de muestra del equipo de referencia se encuentre entre a  $\pm 1$  metro en la vertical. Cuando se trate de dispositivos con un sistema de flujo activo, sepárelos a una distancia de  $\sim 1$  metro, si se trata de dispositivos pasivos puede mantener una distancia menor entre ellos.
  - d. Si es necesario, coloque los dispositivos dentro de un recinto/refugio protector contra la intemperie que mantenga un amplio flujo de aire alrededor del sensor (según lo recomendado por el fabricante).

También tome en consideración las siguientes precauciones:

- e. No coloque los dispositivos cerca de estructuras u objetos que puedan modificar el flujo de aire o bloquear la entrada del sensor.
- f. Evite colocarlos cerca de estructuras u objetos que puedan modificar la temperatura o humedad cerca del sensor, tome en cuenta que los materiales de la superficie del sitio de evaluación podrían tener efectos sobre la temperatura (por ejemplo, techos metálicos).
- g. Aléjese de fuentes o sumideros que puedan alterar las concentraciones del contaminante de interés.

- h. Evite lugares con riesgo de vibración, descarga eléctrica u otros peligros potenciales
3. No actualice la versión del firmware durante la prueba. Utilice los dispositivos en las mismas condiciones en que los recibió del fabricante, sin modificar ninguna configuración o calibración.
4. Si los dispositivos tienen capacidad para almacenar los datos localmente, pueden operar sin una conexión de Internet. Si necesita una conexión a Internet o celular para la operación del dispositivo, entonces asegure que estos no hagan uso de datos de otros equipos del lugar o cercanos para realizar el ajuste de los datos.
5. Registre los datos del equipo y su configuración, incluyendo por lo menos la siguiente información:
  - a. Parámetros medidos y sus unidades.
  - b. Intervalo de tiempo de muestreo.
  - c. Método(s) de almacenamiento (tarjeta de datos, transmisión a la nube del fabricante).
  - d. Forma de los datos almacenados (p. ej., datos sin procesar, datos corregidos o limpios).
  - e. Enfoque empleado por el fabricante para la corrección de datos (cuando corresponda o esté disponible)<sup>7</sup>, incluyendo el enfoque matemático empleado y las variables auxiliares utilizadas para la corrección o ajuste.
    - i. Si la forma en que se corrigen los datos es estática, registre esta información y cualquier enfoque matemático utilizado.
    - ii. Si la forma en que se corrigen los datos cambia o es un proceso dinámico, registre: (i) cuándo cambia el proceso, (ii) por qué cambia el proceso, (iii) cómo/dónde se registran los cambios y (iv) cómo se valida el método de corrección.
    - iii. Cualquier script para el análisis o corrección de datos (p. ej., Jupyter Notebook, R Markdown, etc.).
  - f. El repositorio final de los datos reportados y su formato.
6. Incluya fotografías para documentar claramente la ubicación de los equipos y la configuración del despliegue en el sitio de prueba, documente las distancias mencionadas en los puntos 1 y 2.

---

<sup>7</sup> El proceso de corrección de datos podría no estar disponible.

## 2.5 Realización de la prueba básica

### 2.5.1 PM2.5

1. Registre la fecha de calibración del monitor de referencia en el sitio de prueba.
2. Verifique que los sistemas de adquisición y almacenamiento de datos recopilen todos los datos del equipo y los almacenen de tal manera que pueda acceder a ellos posteriormente. Verifique que haya suficiente capacidad de almacenamiento para evitar que se sobrescriban los datos más antiguos y permita el almacenamiento de datos nuevos.
3. Utilice los dispositivos en las mismas condiciones en que los recibió del proveedor y no modifique ninguna calibración del fabricante. La versión del firmware no deberá actualizarse durante la prueba.
4. Proporcione un período de calentamiento y estabilización para todos los dispositivos según lo especificado por el fabricante. El equipo de referencia deberá encenderse por lo menos 24 horas antes del inicio de las pruebas.
5. Verifique que todos los equipos reporten mediciones.
6. Si la calibración del equipo de referencia no se realizó recientemente ( $\leq 1$  semana), realice la verificación de flujo del monitor de referencia y registre la fecha de la verificación.
7. Permita que todos los equipos operen simultáneamente por los menos durante 30 días consecutivos.
8. Siga las recomendaciones de mantenimiento del fabricante, según corresponda, para todos los dispositivos a evaluar durante la prueba. Registre y reporte todo el mantenimiento o la resolución de problemas realizados, incluidas las fechas/horas.
9. Documente la justificación de los datos faltantes o invalidados. Para una ejecución completa de 30 días consecutivos, lo ideal es obtener al menos un 75 % de tiempo de actividad en todos los instrumentos. Es decir 23 conjuntos de datos válidos para los promedios de 24 horas de todos los equipos.
  - a. Si alguno de los dispositivos falla de forma irreparable antes de que se complete la prueba de 30 o más días, no podrá sustituirlo por otro. Además, el dispositivo no debe devolverse al fabricante para su reparación sin reiniciar el procedimiento de prueba. Se puede presentar un informe preliminar que muestre los motivos de la falla, estos detalles podrán ser útiles para los usuarios potenciales. En caso de reiniciar la prueba deberá hacerlo nuevamente con tres dispositivos.
  - b. Ocasionalmente, el tiempo de actividad podría verse afectado por un corte de energía no planificado, un evento meteorológico u otra causa de fuerza mayor. En esos casos, deberá registrar las fechas y las razones responsables de la falta de datos. En estos escenarios, lo ideal sería que las pruebas continuarán o se reanudarán hasta que se alcance al menos el 75% de los datos válidos de 24 horas simultáneos en los tres dispositivos.
  - c. Si los datos de algún dispositivo no están disponibles durante cada período de muestreo de 24 horas, registre y reporte el motivo (p. ej., interrupción, mantenimiento).

- d. Si alguno de los datos se invalida debido a los criterios de control de calidad, registre el motivo y los criterios utilizados. Los criterios de calidad de los instrumentos de referencia deberán encontrarse documentados en los Procedimientos de Operación Estándar (POE) de la DMCA. Para el caso de los dispositivos a evaluar, los criterios de calidad podrían estar disponibles por parte del fabricante o pueden desarrollarse como parte de la prueba. Es importante documentar los criterios de control de calidad usados, ya que esta información es útil para los usuarios.
10. Seleccione el sitio de prueba para la segunda implementación de campo de acuerdo con los criterios descritos en la sección 2.3.
11. Repita las actividades descritas en las secciones 2.4 y 2.5.1 para la segunda implementación de campo utilizando preferentemente los sensores de la primera implementación de campo. Genere un informe separado para la segunda implementación de campo.

### **2.5.2 Ozono**

1. Registre la fecha de calibración en sitio del equipo de referencia.
2. Verifique que los sistemas de adquisición y almacenamiento de datos recopilen todos los datos del equipo y los almacenen de tal manera que pueda acceder a ellos posteriormente. Verifique que haya suficiente capacidad de almacenamiento para evitar que se sobrescriban los datos más antiguos y permita que el almacenamiento de los datos nuevos.
3. Utilice los dispositivos en las mismas condiciones en que los recibió y no modifique ninguna calibración del fabricante. La versión del firmware no debe actualizarse durante la prueba.
4. Proporcione un período de calentamiento y estabilización para todos los dispositivos según lo especificado por el fabricante. El equipo de referencia deberá encenderse por lo menos 24 horas antes del inicio de las pruebas.
5. Verifique que todos los equipos reporten mediciones.
6. Si la calibración del equipo de referencia no se realizó recientemente ( $\leq 1$  semana), realice la verificación de flujo del monitor de referencia y registre la fecha de la verificación.
7. Permita que todos los equipos operen simultáneamente por lo menos durante 30 días consecutivos.
8. Siga las recomendaciones de mantenimiento del fabricante, según corresponda, para todos los dispositivos a evaluar durante la prueba. Registre y reporte todo el mantenimiento o la resolución de problemas realizados, incluidas las fechas/horas.
9. Documente la justificación de los datos faltantes o invalidados. Para una ejecución completa de 30 días consecutivos, lo ideal es obtener al menos un 75 % de tiempo de actividad en todos los instrumentos. Es decir 540 conjuntos de datos válidos para los promedios de 1 hora de todos los equipos, en un periodo de 30 días (730 horas).

- a. Si alguno de los dispositivos falla de forma irreparable antes de que se complete la implementación de 30 días, no podrá sustituirlo por otro. Además, el dispositivo no debe devolverse al fabricante para su reparación sin reiniciar el procedimiento de prueba. Se puede presentar un informe preliminar que muestre los motivos de la falla, estos detalles podrán ser útiles para los usuarios potenciales. En caso de reiniciar la prueba deberá hacerlo nuevamente con tres dispositivos.
  - b. Ocasionalmente, el tiempo de actividad podría verse afectado por un corte de energía no planificado, un evento meteorológico u otra causa de fuerza mayor. En esos casos, deberá registrar las fechas y las razones responsables de la falta de datos. En estos escenarios, lo ideal sería que las pruebas continuarán o se reanudarán hasta que se alcance al menos el 75% de los datos válidos de 1 hora simultáneos en los tres dispositivos.
  - c. Si los datos de algún dispositivo no están disponibles durante cada período de muestreo de 1 hora, registre y reporte el motivo (p. ej., interrupción, mantenimiento).
  - d. Si alguno de los datos se invalida debido a los criterios de control de calidad, registre el motivo y los criterios utilizados. Los criterios de calidad de los instrumentos de referencia deberán encontrarse documentados en los Procedimientos de Operación Estándar (POE) de la DMCA. Para el caso de los dispositivos a evaluar, los criterios de calidad podrían estar disponibles por parte del fabricante o pueden desarrollarse como parte de la prueba. Es importante documentar los criterios de control de calidad usados, ya que esta información es útil para los usuarios.
10. Seleccione el sitio de prueba para la segunda implementación de campo de acuerdo con los criterios descritos en la sección 2.3.
  11. Repita las actividades descritas en las secciones 2.4 y 2.5.2 para la segunda implementación de campo utilizando preferentemente los sensores de la primera implementación de campo. Genere un informe separado para la segunda implementación de campo.

### 3 MÉTRICAS DE DESEMPEÑO Y CÁLCULOS

Las métricas de desempeño son parámetros utilizados para describir la calidad de los datos obtenidos con los dispositivos de bajo costo. Existe una serie de métricas que serán útiles para entender el desempeño de un dispositivo o sensor. En esta sección se presentan un conjunto de métricas recomendadas junto con los cálculos de apoyo, para evaluar el desempeño de los sensores para PM<sub>2.5</sub> y O<sub>3</sub>. Algunas de estas métricas se definen de maneras diferentes en la literatura, por lo que se recomienda emplear las ecuaciones descritas en esta sección para cualquier comparación. Cualquier desviación de los métodos de cálculo descrito debe justificarse y documentarse claramente. Las definiciones de estas métricas se muestran en la Tabla 1, si requiere más detalles sobre estas métricas le recomendamos consultar el Apéndice C de los documentos de referencia de la US EPA.

**Tabla 1.** Métricas de desempeño recomendadas para los sensores de PM<sub>2.5</sub> y O<sub>3</sub>.

Métrica	Descripción
Precisión	Se entiende como la variación alrededor de la media de un conjunto de mediciones reportadas simultáneamente por tres o más dispositivos del mismo tipo, colocados bajo las mismas condiciones de muestreo. La precisión se determina utilizando la desviación estándar (DE) y el coeficiente de variación (CV).
Desviación o sesgo	Se entiende como el desacuerdo sistemático (no aleatorio) o persistente entre las concentraciones reportadas por los dispositivos y el instrumento de referencia. El sesgo se determina utilizando la pendiente (m) de regresión lineal y el intercepto (b) y describe la exactitud con la que el sensor es capaz de medir un parámetro.
Linealidad	Se refiere a la medida del grado en el cual las mediciones reportadas por un sensor pueden explicar las concentraciones reportadas por el instrumento de referencia. La linealidad se determina utilizando el coeficiente de determinación (R <sup>2</sup> ).
Error	Es la medida del desacuerdo entre las concentraciones del contaminante reportada por el sensor con respecto al instrumento de referencia. El error se mide utilizando el error cuadrático medio (RMSE, por sus siglas en inglés) y en el caso de PM <sub>2.5</sub> con el error cuadrático medio normalizado (NRMSE, por sus siglas en inglés).
Exploración de los efectos meteorológicos	Es la exploración gráfica para buscar una respuesta positiva o negativa en la medición, causada por variaciones en la temperatura ambiente, la humedad relativa o el punto de rocío, y no por cambios en la concentración del contaminante objetivo.

### 3.1 PM<sub>2.5</sub>

Antes de iniciar verifique que los tiempos en todos los conjuntos de datos se encuentren alineados. Recuerde que para el cálculo de cualquier promedio será necesario un mínimo de 75% de datos válidos.

#### 3.1.1 Estimación de los promedios de 24 horas

Todos los datos recopilados como intervalos de tiempo menores a 24 horas se promediarán de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$x_{kdj} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_{ij} \quad (1),$$

donde:

$x_{kdj}$  = promedio de 24 horas de la medición  $k$  para el día  $d$  y el instrumento  $j$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $^{\circ}\text{C}$  o  $\% \text{HR}$ )

$n$  = número de mediciones instrumentales para cada periodo de 24 horas

$c_{ij}$  = mediciones del instrumento  $j$  para el tiempo  $i$  del periodo de 24 horas ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ,  $\% \text{HR}$ )

#### 3.1.2 Estimación del promedio del despliegue

El promedio del despliegue se refiere al valor promedio durante los 30 días (o más) que duró la prueba. Este valor se calcula a partir de los datos promediados de 24 horas de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\bar{x}_k = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \left[ \frac{1}{N} \sum_{d=1}^N x_{dj} \right] \quad (2),$$

donde:

$\bar{x}_k$  = promedio del despliegue  $k$  para la prueba de campo ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $^{\circ}\text{C}$  o  $\% \text{HR}$ )

$M$  = número de instrumentos idénticos operados simultáneamente durante la prueba de campo

$N$  = número de periodos de 24 horas durante los cuales todos los instrumentos idénticos estuvieron funcionando y reportando promedios válidos durante la prueba de campo

$x_{dj}$  = mediciones válidas de 24 horas para el día  $d$  y el instrumento  $j$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ,  $\% \text{RH}$ )

#### 3.1.3 Precisión

La precisión entre dispositivos idénticos se caracteriza con dos métricas: la desviación estándar ( $DE$ ) y el coeficiente de variación ( $CV$ ). Ambas métricas se calcularán utilizando sólo los promedios de 24 horas obtenidos con todos los sensores idénticos operando simultáneamente. La desviación estándar se calculará con la siguiente ecuación:

$$DE = \sqrt{\frac{1}{(N \times M) - 1} \sum_{j=1}^M \left[ \sum_{d=1}^N (x_{dj} - \bar{x}_d)^2 \right]} \quad (3),$$

donde:

DE = desviación estándar de los promedios de 24 horas

$M$  = número de sensores idénticos operados simultáneamente durante la prueba de campo

$N$  = número de periodos de 24 horas en los cuales los instrumentos idénticos estuvieron operando y reportaron valores válidos durante la duración de la prueba de campo

$x_{dj}$  = mediciones válidas de 24 horas para el día  $d$  y el instrumento  $j$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $^{\circ}\text{C}$ , %RH)

$\bar{x}_d$  = promedio de 24 horas de los sensores para el día  $d$

El coeficiente de variación se calcula a partir de la DE cómo se indica en la siguiente ecuación:

$$CV = \frac{DE}{\bar{x}} \times 100 \quad (4),$$

donde:

$CV$  = Coeficiente de variación

$DE$  = desviación estándar de los promedios de 24 horas de las mediciones ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $^{\circ}\text{C}$ , %RH)

$\bar{x}$  = promedio del despliegue para la prueba de campo ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $^{\circ}\text{C}$ , %RH)

### 3.1.4 Sesgo y linealidad

Se evalúa con un modelo de regresión lineal simple ( $y = mx + b$ ) que compara las mediciones promediadas de 24 horas de los sensores (variable dependiente,  $y$ ) con las mediciones del equipo empleado como referencia (variable independiente,  $x$ ), calculando la pendiente ( $m$ ), intersección ( $b$ ) y el coeficiente de determinación ( $R^2$ ). Se realiza una regresión lineal simple para los promedios del despliegue y de cada dispositivo. Los dispositivos con modelos de regresión similares y valores de  $R^2$  elevados suelen ser más precisos que aquellos con modelos de regresión diferentes y valores de  $R^2$  menores.

### 3.1.5 Error

Se calcula a partir del error cuadrático medio ( $RMSE$ , por sus siglas en inglés) para estimar el error asociado con las mediciones del dispositivo usando los datos durante los cuales todos los equipos reportaron mediciones válidas promediadas de 24 horas, y comparando contra la medición del equipo de referencia. El  $RMSE$  se define como la raíz del cuadrado de cada diferencia calculada entre las mediciones del equipo a evaluar y las mediciones del instrumento de referencia.

El  $RMSE$  se obtiene en unidades de concentración de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{(N \times M)} \sum_{j=1}^M \left[ \sum_{d=1}^N (x_{dj} - R_d)^2 \right]} \quad (5),$$

donde:

$RMSE$  = error cuadrático medio ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ,  $\%RH$ )

$M$  = número de sensores idénticos operados simultáneamente durante la prueba de campo

$N$  = número de periodos de 24 horas durante los cuales los instrumentos idénticos estuvieron operando y reportaron valores válidos durante la duración de la prueba de campo

$x_{dj}$  = mediciones válidas de 24 horas para el día  $d$  y el instrumento  $j$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ,  $\%RH$ )

$R_d$  = concentración promedio de 24 horas del equipo de referencia para el día  $d$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ,  $\%RH$ )

A partir del  $RMSE$  se calcula el valor del error cuadrático medio normalizado ( $NRMSE$ , por sus siglas en inglés) usando el promedio de las concentraciones del equipo de referencia promediadas durante 24 horas durante el período de prueba, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$NRMSE = \frac{RMSE}{R_d} \times 100 \quad (6),$$

donde:

$NRMSE$  = error cuadrático medio normalizado (%)

$RMSE$  = error cuadrático medio ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

$\bar{R}_d$  = concentración promedio de los valores de 24 horas del equipo de referencia para todo el periodo de prueba ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

### 3.1.6 Efectos de las condiciones ambientales

Hay varias formas de investigar la posible influencia de la temperatura, humedad, el punto de rocío u otras variables utilizando los datos de las pruebas de campo. Si bien, no se reconoce una metodología específica, existen varias formas gráficas para tratar de comprender el efecto de la meteorología. Algunos ejemplos se describen a continuación, puede emplear más de uno en su evaluación.

#### 3.1.6.1 Diagramas de dispersión

Puede elaborar gráficos de dispersión con los datos de los sensores en el eje  $y$  (variable dependiente) y las mediciones de los parámetros meteorológicos (reportadas por los monitores de referencia para temperatura y humedad relativa, no por los dispositivos) en el eje  $x$  (variable independiente). Los datos de los sensores se pueden utilizar en forma de la concentración normalizada, la diferencia de concentración o la diferencia de concentración absoluta. Algunos de los gráficos que podría elaborar incluyen:

- La concentración promedio de 24 horas de  $PM_{2.5}$  normalizada contra el promedio de 24 horas del punto de rocío.
- La concentración promedio de 24 horas de  $PM_{2.5}$  normalizada contra el promedio de 24 horas de la humedad relativa.

- La concentración promedio de 24 horas de  $PM_{2.5}$  normalizada contra el promedio de 24 horas de la temperatura.
- La diferencia entre la concentración promedio de 24 horas del sensor de  $PM_{2.5}$  y el equipo de referencia, contra el promedio de 24 horas del punto de rocío.
- La diferencia entre la concentración promedio de 24 horas del sensor de  $PM_{2.5}$  y el equipo de referencia, contra el promedio de 24 horas de la humedad relativa.
- La diferencia entre la concentración promedio de 24 horas del sensor de  $PM_{2.5}$  y el equipo de referencia, contra el promedio de 24 horas de la temperatura.
- La diferencia absoluta entre la concentración promedio de 24 horas del sensor de  $PM_{2.5}$  y el equipo de referencia, contra el promedio de 24 horas del punto de rocío.
- La diferencia absoluta entre la concentración promedio de 24 horas del sensor de  $PM_{2.5}$  y el equipo de referencia, contra el promedio de 24 horas de la humedad relativa.
- La diferencia absoluta entre la concentración promedio de 24 horas del sensor de  $PM_{2.5}$  y el equipo de referencia, contra el promedio de 24 horas de la temperatura.

### 3.1.6.2 Concentración Normalizada

Las concentraciones normalizadas del promedio de 24 horas del sensor de  $PM_{2.5}$  se obtienen dividiendo la concentración promedio de 24 horas de  $PM_{2.5}$ , entre la concentración promedio de 24 horas de  $PM_{2.5}$  del equipo de referencia.

$$ConcNorm_{dj} = \frac{x_{dj}}{R_d} \quad (7),$$

dónde:

$ConcNorm_{dj}$  = concentración promedio de 24 horas del sensor de  $PM_{2.5}$  normalizada para el día  $d$  y el instrumento  $j$  (sin unidades)

$x_{dj}$  = concentración promedio de 24 horas del sensor de  $PM_{2.5}$  para el día  $d$  y el instrumento  $j$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

$R_d$  = concentración válida del promedio de 24 horas de  $PM_{2.5}$  del equipo de referencia para el día  $d$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

### 3.1.6.3 Diferencia y diferencia absoluta de la concentración

La diferencia de la concentración promedio de 24 horas se obtiene restando al valor del promedio de  $PM_{2.5}$  del sensor, el valor del promedio de 24 horas de la concentración de  $PM_{2.5}$  del equipo de referencia.

$$\Delta C_{dj} = x_{dj} - R_d \quad (8a),$$

dónde:

$\Delta C_{dj}$  = diferencia de la concentración de  $PM_{2.5}$  promedio de 24 horas entre el sensor el equipo de referencia

$x_{dj}$  = concentración promedio de 24 horas del sensor de PM<sub>2.5</sub> para el día  $d$  y el instrumento  $j$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

$R_d$  = concentración válida del promedio de 24 horas de PM<sub>2.5</sub> del equipo de referencia para el día  $d$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

La diferencia absoluta de la concentración promedio de 24 horas de PM<sub>2.5</sub> se obtiene del valor absoluto de la diferencia entre la concentración promedio de 24 horas del sensor y la concentración del equipo de referencia.

$$Abs\Delta C_{dj} = |x_{dj} - R_d| \quad (8b),$$

dónde:

$Abs\Delta C_{dj}$  = diferencia absoluta de la concentración de PM<sub>2.5</sub> promedio de 24 horas entre el sensor el equipo de referencia

$x_{dj}$  = concentración promedio de 24 horas del sensor de PM<sub>2.5</sub> para el día  $d$  y el instrumento  $j$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

$R_d$  = concentración válida del promedio de 24 horas de PM<sub>2.5</sub> del equipo de referencia para el día  $d$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

#### 3.1.6.4 Punto de rocío

El punto de rocío ( $DP$ , por sus siglas en inglés) promedio de 24 horas se deriva de las mediciones de temperatura y humedad relativa obtenidas de los instrumentos de referencia, no debe calcularse utilizando las mediciones de temperatura y humedad del dispositivo en evaluación, ya que estas mediciones podrían no representar con precisión las condiciones ambientales.

$$DP_d = 243.04 \times \left[ \frac{\ln\left(\frac{HR_d}{100}\right) + \frac{(17.625 \times T_d)}{(243.04 + T_d)}}{17.625 - \ln\left(\frac{HR_d}{100}\right) - \frac{(17.625 \times T_d)}{(243.04 + T_d)}} \right] \quad (9),$$

Donde:

$DP_d$  = promedio de 24 horas del punto de rocío para el día  $d$  ( $^{\circ}\text{C}$ )

$HR_d$  = promedio de 24 horas de la humedad relativa para el día  $d$  (%)

$T_d$  = promedio de 24 horas de la temperatura para el día  $d$  (%)

## 3.2 Ozono

Antes de iniciar verifique que la hora en todos los conjuntos de datos se encuentre alineada. En el cálculo de cualquier promedio será necesario un mínimo de 75% de datos válidos.

### 3.2.1 Estimación de los promedios de 1 hora

Todos los datos recopilados como intervalos de tiempo menores a 1 hora se promediaron de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$x_{khj} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_{ij} \quad (10),$$

donde:

$x_{khj}$  = promedio de 1 hora de la medición  $k$  la hora  $h$  para el instrumento  $j$  (ppbv, °C o %HR)

$n$  = número de mediciones instrumentales para cada periodo de 1 hora

$c_{ij}$  = mediciones del instrumento  $j$  para el tiempo  $i$  del periodo de 1 hora (ppbv, °C, %HR)

### 3.2.2 Estimación del promedio del despliegue

El promedio del despliegue se refiere al valor promedio durante los 30 días (o más) que duró el despliegue. Este valor se calcula a partir de los datos promediados de 1 hora de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\bar{x}_k = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \left[ \frac{1}{N} \sum_{h=1}^N x_{hj} \right] \quad (11),$$

donde:

$\bar{x}_k$  = promedio del despliegue  $k$  para la prueba de campo (ppbv, °C o %HR)

$M$  = número de instrumentos idénticos operados simultáneamente durante la prueba de campo

$N$  = número de períodos de 1 hora durante los cuales todos los instrumentos idénticos están funcionando y reportando promedios válidos durante la prueba de campo

$x_{dj}$  = mediciones válidas de 1 hora para la hora  $h$  y el instrumento  $j$  (ppbv, °C, %HR)

### 3.2.3 Precisión

La precisión entre dispositivos idénticos se caracteriza con dos métricas: la desviación estándar ( $DE$ ) y el coeficiente de variación ( $CV$ ). Ambas métricas se calculan utilizando los promedios de 24 horas cuando todos los sensores idénticos estuvieron operando simultáneamente. La desviación estándar se calculará con la siguiente ecuación:

$$DE = \sqrt{\frac{1}{(N \times M) - 1} \sum_{j=1}^M \left[ \sum_{h=1}^N (x_{hj} - \bar{x}_h)^2 \right]} \quad (12),$$

donde:

$DE$  = desviación estándar de los promedios de 1 hora del sensor de  $O_3$  (ppbv)

$M$  = número de sensores idénticos operados simultáneamente durante la prueba de campo

$N$  = número de periodos de 1 hora durante los cuales los instrumentos idénticos estuvieron operando y reportaron valores válidos durante la duración de la prueba de campo

$x_{hj}$  = mediciones válidas de 1 hora para la hora  $h$  y el instrumento  $j$  (ppbv)

$\bar{x}_h$  = promedio de las concentraciones de 1 hora de los tres sensores para la hora  $h$  (ppbv)

El coeficiente de variación se calcula a partir de la  $DE$  cómo se indica en la siguiente ecuación:

$$CV = \frac{DE}{\bar{x}} \times 100 \quad (13),$$

donde:

$CV$  = Coeficiente de variación

$DE$  = desviación estándar de los promedios de 1 hora de las mediciones de  $O_3$  (ppbv)

$\bar{x}$  = promedio del despliegue para la prueba de campo (ppbv)

### 3.2.4 Sesgo y linealidad

Se evalúa con un modelo de regresión lineal simple ( $y = mx + b$ ) que compara las mediciones promediadas de 1 hora de los sensores (variable dependiente,  $y$ ) con las mediciones del equipo empleado como referencia (variable independiente,  $x$ ), calculando la pendiente ( $m$ ), intersección ( $b$ ) y el coeficiente de determinación ( $R^2$ ). Se realizará una regresión lineal simple para los promedios del despliegue y de cada dispositivo (con las gráficas correspondientes). Los dispositivos con modelos de regresión similares y valores de  $R^2$  elevados suelen ser más precisos que aquellos con modelos de regresión diferentes y valores de  $R^2$  menores.

### 3.2.5 Error

Se calcula a partir del  $RMSE$  para estimar el error asociado con las mediciones del dispositivo usando los datos durante los cuales todos los equipos reportaron mediciones válidas promediadas de 24 horas, y comparando contra la medición del equipo de referencia. El  $RMSE$  se define como la raíz del cuadrado de cada diferencia calculada entre las mediciones del equipo a evaluar y las mediciones del instrumento de referencia.

El *RMSE* se obtiene en unidades de concentración de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{(N \times M)} \sum_{j=1}^M \left[ \sum_{h=1}^N (x_{hj} - R_h)^2 \right]} \quad (14),$$

donde:

*RMSE* = error cuadrático medio (ppbv)

*M* = número de sensores idénticos operados simultáneamente durante la prueba de campo

*N* = número de periodos de 1 hora durante los cuales los instrumentos idénticos estuvieron operando y reportaron valores válidos durante la duración de la prueba de campo

$x_{hj}$  = mediciones válidas de 1 hora para la hora *h* y el instrumento *j* (ppbv)

$R_d$  = concentración promedio de 1 hora del equipo de referencia para la hora *h* (ppbv)

### 3.2.6 Efectos de las condiciones ambientales

Hay varias formas de investigar la posible influencia de la temperatura, humedad, punto de rocío u otras variables utilizando datos de las pruebas de campo. Si bien, no se reconoce una metodología específica, existen varias formas gráficas para tratar de comprender el efecto de la meteorología. Algunos ejemplos se describen a continuación.

#### 3.2.6.1 Diagramas de dispersión

Puede elaborar gráficos de dispersión con los datos de los sensores en el eje y (variable dependiente) y las mediciones de los parámetros meteorológicos (reportadas por los monitores de referencia para temperatura y humedad relativa, no por los dispositivos) en el eje x (variable independiente). Los datos de los sensores se pueden utilizar en forma de la concentración normalizada, la diferencia de concentración o la diferencia de concentración absoluta. Algunos de los gráficos que podría elaborar incluyen:

- La concentración promedio de 1 hora de O<sub>3</sub> normalizada contra el promedio de 1 hora del punto de rocío.
- La concentración promedio de 1 hora de O<sub>3</sub> normalizada contra el promedio de 1 hora de la humedad relativa.
- La concentración promedio de 1 hora de O<sub>3</sub> normalizada contra el promedio de 1 hora de la temperatura.
- La diferencia entre la concentración promedio de 1 hora del sensor de O<sub>3</sub> y el equipo de referencia, contra el promedio de 1 hora del punto de rocío.
- La diferencia entre la concentración promedio de 1 hora del sensor de O<sub>3</sub> y el equipo de referencia, contra el promedio de 1 hora de la humedad relativa.
- La diferencia entre la concentración promedio de 1 hora del sensor de O<sub>3</sub> y el equipo de referencia, contra el promedio de 1 hora de la temperatura.

- La diferencia absoluta entre la concentración promedio de 1 hora del sensor de O<sub>3</sub> y el equipo de referencia, contra el promedio de 1 hora del punto de rocío.
- La diferencia absoluta entre la concentración promedio de 1 hora del sensor de O<sub>3</sub> y el equipo de referencia, contra el promedio de 1 hora de la humedad relativa.
- La diferencia absoluta entre la concentración promedio de 1 hora del sensor de O<sub>3</sub> y el equipo de referencia, contra el promedio de 1 hora de la temperatura.

Opcionalmente, si los datos de interferentes están disponibles puede elaborar gráficos de dispersión adicionales para:

- La concentración promedio de 1 hora de O<sub>3</sub> normalizada contra el promedio de 1 hora de CO.
- La concentración promedio de 1 hora de O<sub>3</sub> normalizada contra el promedio de 1 hora de NO<sub>2</sub>.
- La concentración promedio de 1 hora de O<sub>3</sub> normalizada contra el promedio de 1 hora de SO<sub>2</sub>.
- La diferencia entre la concentración promedio de 1 hora del sensor de O<sub>3</sub> y el equipo de referencia, contra el promedio de 1 hora del CO.
- La diferencia entre la concentración promedio de 1 hora del sensor de O<sub>3</sub> y el equipo de referencia, contra el promedio de 1 hora del NO<sub>2</sub>.
- La diferencia entre la concentración promedio de 1 hora del sensor de O<sub>3</sub> y el equipo de referencia, contra el promedio de 1 hora del SO<sub>2</sub>.
- La concentración promedio de 1 hora del equipo de referencia contra el promedio de 1 hora de CO.
- La concentración promedio de 1 hora del equipo de referencia contra el promedio de 1 hora de NO<sub>2</sub>.
- La concentración promedio de 1 hora del equipo de referencia contra el promedio de 1 hora de SO<sub>2</sub>.

### 3.2.6.2 Concentración Normalizada

Las concentraciones normalizadas del promedio de 1 hora del sensor de O<sub>3</sub> se obtienen dividiendo la concentración promedio de 1 hora de O<sub>3</sub> entre la concentración promedio de 1 hora de O<sub>3</sub> del equipo de referencia.

$$ConcNorm_{hj} = \frac{x_{hj}}{R_h} \quad (15),$$

dónde:

$ConcNorm_{hj}$  = concentración promedio de 1 hora del sensor de O<sub>3</sub> normalizada para la hora  $h$  y el instrumento  $j$  (sin unidades)

$x_{hj}$  = concentración promedio de 1 hora del sensor de O<sub>3</sub> para la hora  $h$  y el instrumento  $j$  (ppbv)

$R_h$  = concentración válida del promedio de 1 hora de O<sub>3</sub> del equipo de referencia para la hora  $h$  (ppbv)

### 3.2.6.3 Diferencia y diferencia absoluta de la concentración

La diferencia de la concentración promedio de 1 hora se obtiene restando al valor del promedio de O<sub>3</sub> del sensor, el valor del promedio de 1 hora de la concentración de O<sub>3</sub> del equipo de referencia.

$$\Delta C_{hj} = x_{hj} - R_h \quad (16a),$$

dónde:

$\Delta C_{hj}$  = diferencia de la concentración de O<sub>3</sub> promedio de 1 hora entre el sensor el equipo de referencia

$x_{hj}$  = concentración promedio de 1 hora del sensor de O<sub>3</sub> para la hora  $h$  y el instrumento  $j$  (ppb)

$R_h$  = concentración válida del promedio de 1 hora de O<sub>3</sub> del equipo de referencia para la hora  $h$  (ppb)

La diferencia absoluta de la concentración promedio de 1 hora de O<sub>3</sub> se obtiene del valor absoluto de la diferencia entre la concentración promedio de 1 hora del sensor y la concentración del equipo de referencia.

$$Abs\Delta C_{hj} = |x_{hj} - R_h| \quad (16b),$$

dónde:

$Abs\Delta C_{hj}$  = diferencia absoluta de la concentración de O<sub>3</sub> promedio de 1 hora entre el sensor el equipo de referencia (ppbv)

$x_{hj}$  = concentración promedio de 1 hora del sensor de O<sub>3</sub> para la hora  $h$  y el instrumento  $j$  (ppbv)

$R_h$  = concentración válida del promedio de 1 hora de O<sub>3</sub> del equipo de referencia para la hora  $h$  (ppbv).

### 3.2.6.4 Punto de rocío

El punto de rocío (DP, por sus siglas en inglés) promedio de 1 hora se deriva de las mediciones de temperatura y humedad relativa obtenidas de los instrumentos de referencia, no debe calcularse utilizando las mediciones de temperatura y humedad de los dispositivos en evaluación, ya que estas mediciones podrían no representar con precisión las condiciones ambientales.

$$DP_h = 243.04 \times \left[ \frac{\ln\left(\frac{HR_h}{100}\right) + \frac{(17.625 \times T_h)}{(243.04 + T_h)}}{17.625 - \ln\left(\frac{HR_h}{100}\right) - \frac{(17.625 \times T_h)}{(243.04 + T_h)}} \right] \quad (17),$$

Donde:

$DP_h$  = promedio de 1 hora del punto de rocío para la hora  $h$  (°C)

$HR_h$  = promedio de 1 hora de la humedad relativa para la hora  $h$  (%)

$T_h$  = promedio de 1 hora de la temperatura para la hora  $h$  (%)

## 4 VALORES OBJETIVO

Las Tablas 2 y 3 resumen las métricas clave del desempeño y los valores objetivo recomendados por la US EPA para los protocolos de la prueba básica para los sensores de bajo costo de PM<sub>2.5</sub> y O<sub>3</sub>, respectivamente. Se sugieren estos valores para aplicaciones de monitoreo complementario e informativo no-regulatorio de sitio fijo en exteriores y ambiente. Los valores objetivo reflejan el estado actual de la ciencia y, de acuerdo con la evidencia, deberían ser posibles de alcanzar. El razonamiento detrás de la elección de estos valores se puede consultar en los documentos originales de la US EPA.

Se sugiere adoptar estos valores en las pruebas de evaluación cuando se desconozcan las necesidades de la aplicación o no exista un requerimiento de desempeño previo como parte del diseño del estudio o en las regulaciones locales.

**Tabla 2.** Valores objetivo para las métricas de desempeño para los sensores de PM<sub>2.5</sub>.

Métrica de desempeño		Valor objetivo	Sección que describe el cálculo
Precisión	Desviación estándar ( <i>DE</i> )	$\leq 5 \mu\text{g}/\text{m}^3$	3.1.3
	o Coeficiente de variación ( <i>CV</i> )	$\leq 30 \%$	3.1.3
Sesgo	Pendiente ( <i>m</i> )	$1.0 \pm 0.35$	3.1.4
	Intercepto ( <i>b</i> )	$-5 \leq b \leq 5 \mu\text{g}/\text{m}^3$	3.1.4
Linealidad	Coeficiente de determinación ( <i>R</i> <sup>2</sup> )	$\geq 0.70$	3.1.4
Error	Error cuadrático medio ( <i>RMSE</i> )	$\leq 7 \mu\text{g}/\text{m}^3$	3.1.5
	o RMSE normalizado ( <i>NRMSE</i> )	$\leq 30 \%$	3.1.5

**Tabla 3.** Valores objetivo para las métricas de desempeño para los sensores de O<sub>3</sub>.

Métrica de desempeño		Valor objetivo	Sección que describe el cálculo
Precisión	Desviación estándar ( <i>DE</i> )	$\leq 5 \text{ ppbv}$	3.2.3
	o Coeficiente de variación ( <i>CV</i> )	$\leq 30 \%$	3.2.3
Sesgo	Pendiente ( <i>m</i> )	$1.0 \pm 0.2$	3.2.4
	Intercepto ( <i>b</i> )	$-5 \leq b \leq 5 \text{ ppb}$	3.2.4
Linealidad	Coeficiente de determinación ( <i>R</i> <sup>2</sup> )	$\geq 0.80$	3.2.4
Error	Error cuadrático medio ( <i>RMSE</i> )	$\leq 5 \text{ ppbv}$	3.2.5

## **5 CONSIDERACIONES FINALES**

Este documento tiene como objetivo principal establecer una guía mínima y compartir protocolos básicos desarrollados para la realización de ejercicios de evaluación de sistemas de microsensores enfocados en la medición de contaminantes atmosféricos en exteriores. Esta guía y los protocolos incluidos podrán servir para la elaboración de estándares de desempeño para propiamente evaluar alcances de precisión y exactitud e identificar limitaciones en la confiabilidad de los datos generados.

En este proyecto se evaluaron sensores principalmente desplegados en campo en condiciones ambientales, sin embargo, con el conocimiento adquirido a partir de este ejercicio, se recomienda que también se realicen evaluaciones en el laboratorio bajo condiciones controladas. En campo, los sensores se pueden probar para determinar el desempeño en general junto a las estaciones de monitoreo de calidad del aire existentes del Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México, la cual utiliza instrumentos tradicionales de referencia o métodos equivalentes. Las pruebas de los sensores podrán así siguiendo esta guía demostrar sus capacidades para la medición de contaminantes y consecuentemente la estimación de calidad del aire. Sin embargo, la dependencia en las condiciones y concentraciones de contaminantes ambientales limitan la experimentación de mediciones a altas concentraciones, por lo que consecuentemente se limita el conocimiento del desempeño de estos sensores bajo tales condiciones y variaciones climáticas.

Por último, los procedimientos y recomendaciones derivados de este proyecto pueden ser ampliados o modificados según el caso y de acuerdo con los objetivos del estudio o aplicación deseables, siempre y cuando se busque el mejoramiento de éstos.