



Recomendaciones o pautas para la validación de sensores de bajo costo

En el marco del apoyo técnico en calidad del aire a los países de América Latina y el Caribe

Elaborado por el Clean Air Institute por solicitud del Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente

Octubre de 2022

Contenido

Introducción.....	2
Uso actual de los Sensores de Bajo Costo: Áreas de Aplicación.....	3
Casos Exitosos en el Uso de Sensores de Bajo Costo.....	3
El Uso y la Comunicación de los Datos de Sensores de Bajo Costo.....	5
Consideraciones Técnicas y Desempeño de los Sensores de Bajo Costo	6
Consideraciones Técnicas	6
Características Relacionadas al Desempeño: Definiciones y Relevancia.....	8
Otras características relevantes de los SBC	11
Criterios de Selección.....	11
Probando el Desempeño de un Sensor de Bajo Costo: Protocolos	13
Inter-comparación	14
Consideraciones de los Datos	16
Prueba Base	17
Pasos para la Prueba Base	19
Prueba Mejorada	22
Pasos para la Prueba Mejorada	23
Criterios para las Características de Desempeño: ¿Cómo Calcularlos?.....	29
Cálculos para el Protocolo de Prueba Base	29
Cálculos para el Protocolo de la Prueba Mejorada.....	35
Criterios de Aceptabilidad para SBC	41
Compilación de SBC	44
Referencias.....	47

Introducción

Desde inicios del siglo XXI, ha empezado a ganar notoriedad un nuevo tipo de equipos que parece ofrecer numerosas ventajas en el campo de la calidad de aire. Estos instrumentos, conocidos como Sensores de Bajo Costo (LCSs por sus siglas en inglés) le permiten al usuario detectar concentraciones de contaminantes en el aire ambiente. Al ser comparados con los instrumentos usados en el monitoreo regulatorio de contaminantes criterio (o monitoreo de referencia), los Sensores de Bajo Costo (SBC) tienen menores costos de compra, menor consumo de energía además de ser livianos y pequeños, lo que facilita su transporte. Adicionalmente son fáciles de operar y algunos han desarrollado aplicaciones amigables en las que se pueden visualizar los datos, lo que los hace atractivos para usuarios de la sociedad civil y para la recolección de datos de investigación por parte de grupos académicos.

Los SBC se han usado con diversos objetivos. Como herramientas con propósitos educativos y herramientas de aprendizaje (permitiendo a las comunidades obtener una estimación de la calidad de aire local), hasta para la identificación de puntos críticos de contaminación, para aplicaciones de exposición personal y también en investigación. Los SBC han permitido crear conciencia y destacar la importancia de la calidad del aire para muchas comunidades. También han sido utilizados para aumentar la densidad de las redes de monitoreo de calidad del aire existentes. Al instalar SBC cerca de estaciones de monitoreo de referencia, estos han proporcionado datos adicionales y han cerrado brechas de información o apoyado la identificación de variaciones de la contaminación del aire a nivel local, principalmente en ciudades que ya cuentan con buenas redes de monitoreo de calidad de aire y donde un número considerable de SBC han sido desplegados.

A diferencia de los Instrumentos de Grado Regulatorio, que utilizan métodos estandarizados de referencia para cada contaminante específico y que son acreditados bajo procesos de certificación rigurosos que garantizan la alta calidad de los datos reportados, los SBC carecen de la confiabilidad de los datos medidos, principalmente porque son muy sensibles a factores ambientales. Adicionalmente, en la actualidad no existen protocolos de prueba para todo el rango de contaminantes que se pueden medir con la tecnología actual de SBC. Sin embargo, en 2021, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA por sus siglas en inglés), publicó los primeros protocolos de prueba, criterios y metas para evaluar el desempeño de SBC de ozono (O_3) y material particulado fino ($PM_{2.5}$) en aplicaciones de monitoreo en aire ambiente, de grado no regulatorio suplementario e informativo (NSIM por sus siglas en inglés). Estos reportes son clave para países en desarrollo que, debido a límites presupuestales, estén considerando el uso de SBC como una herramienta de apoyo para adquirir información de calidad de aire para este tipo de aplicaciones.

Basado en los reportes de la EPA y en el conocimiento científico actual, el objetivo de este documento es proveer recomendaciones y guía para que los países puedan desarrollar e implementar protocolos para probar y validar el desempeño de los SBC, incluyendo criterios de aceptabilidad

Uso actual de los Sensores de Bajo Costo: Áreas de Aplicación

Existen varias áreas de aplicación para el uso de la tecnología de SBC. Algunas se han usado ya por algún tiempo mientras que otras están surgiendo. Por ejemplo, gobiernos e instituciones de planeación han empezado a usar SBC combinándolos con la información proveída por redes de monitoreo de referencia bien establecidas. Esto les ha permitido adquirir un nivel más detallado de concentraciones de contaminantes atmosféricos, identificar puntos críticos de contaminación y apoyar la gestión de la calidad del aire a través de acciones de política.

Otra área de aplicación son las actividades de ciencia ciudadana, donde comunidades locales se organizan para hacer observaciones de parámetros de contaminación del aire. Esta área de aplicación apoya actividades educativas que aumentan la vinculación del público y su conocimiento a través del desarrollo de información pública por medio del despliegue de SBC para el monitoreo comunitario. Normalmente estas actividades se llevan a cabo con la colaboración cercana entre ciudadanos, empresas, investigadores, ONGs y gobiernos locales e instituciones.

Un área de aplicación adicional que tiene varios esfuerzos en marcha en grupos de calidad de aire y salud es la recolección de datos de exposición personal a contaminantes del aire. Los SBC portátiles pueden proveer el orden de magnitud o añadir mediciones para ser comparadas con datos oficiales de exposición personal en lugares específicos. La tecnología de los SBC permite obtener mediciones de una mayor resolución temporal y datos más representativos que las tecnologías tradicionales de muestreo pasivo.

Otras áreas de aplicación que han empezado a tener un rol incluyen la investigación básica y aplicada en universidades e institutos u organizaciones de investigación, para adquirir datos a corto y largo plazo para la evaluación de la variabilidad espacial de la contaminación y para la validación de modelaciones o emisiones. Agencias meteorológicas, instituciones gubernamentales e institutos u organizaciones de investigación también han empezado a beneficiarse del uso de la tecnología de SBC, al explorar su uso para identificar tendencias en el comportamiento de parámetros de composición atmosférica para apoyar convenciones internacionales como la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), el Programa de Vigilancia de la Atmosfera Global (GAW por sus siglas en inglés) de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Sistema de Observación Climática Global (GCOS por sus siglas en inglés).

Casos Exitosos en el Uso de Sensores de Bajo Costo

Los SBC han sido desplegados en varios proyectos a nivel mundial y hay muchos casos de éxito en su uso. Un ejemplo es **Breathe London**, un proyecto ejecutado por El Grupo de Investigación Ambiental del Imperial College de Londres. El proyecto tiene una red de 100 SBC localizados en la zona administrativa Gran Londres que han sido instalados en postes de la luz y edificios. Adicionalmente utiliza SBC móviles acoplados a vehículos de Google Street View para medir la contaminación del aire en vías y también ha desplegado SBC portátiles en los maletines de estudiantes y profesores durante un estudio piloto de la Autoridad del Gran Londres. El objetivo de la iniciativa es generar datos que ayuden a identificar áreas críticas de contaminación y los beneficios de acciones implementadas para mejorar la calidad del aire.

Breathe London ofrece SBC a quien esté interesado y comparte los datos en una plataforma basada en Google Cloud, que provee gráficas y visualizaciones amigables para el usuario. Los datos obtenidos se transmiten y publican de forma continua en la página web de Breathe London, la cual presenta información en tiempo real de concentraciones de NO_2 y $\text{PM}_{2.5}$ y pronósticos de la calidad del aire para los 3 días siguientes. Los datos producidos se usan en combinación con los datos de la Red de Aire de Referencia de Londres, llenando las brechas de información y cubriendo lugares sensibles prioritarios como escuelas primarias y centros de atención médica. Los lugares para ubicar los SBC incluyen una mezcla de niveles de tráfico y diversas distancias a vías principales e intersecciones, parques, áreas residenciales, calles de alto flujo vehicular y otras áreas comerciales. Las ubicaciones también se definen para que puedan proveer apoyo para la evaluación del impacto de nuevas políticas diseñadas para reducir la contaminación del aire como las zonas de emisiones ultra-bajas (ULEZ por sus siglas en inglés), la ULEZ expandida y los buses de bajas emisiones (LEBZ por sus siglas en inglés).

Para poder presentar información casi en tiempo real, los datos preliminares publicados en la página son provisionales y están sujetos a cambios mientras que se someten a chequeos de aseguramiento de calidad. La plataforma guarda los datos y los factores de corrección de manera separada y apoya los procesos de aseguramiento de calidad y control de calidad (QA/QC por sus siglas en inglés), permitiéndole al equipo técnico modificar las calibraciones y corregir los datos inciertos. El proyecto reserva 3 de los SBC para evaluar el desempeño en el largo plazo, usando estudios periódicos de intercomparación con Instrumentos de Grado Regulatorio¹.

Otro ejemplo es el programa de **Ciudadanos Científicos**, una iniciativa en Colombia gestionada por el Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá (SIATA) del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA, autoridad ambiental local del municipio núcleo que es Medellín y de los 9 municipios que conforman su área metropolitana) y la alcaldía. El proyecto fue lanzado en 2015 cuando los ciudadanos ofrecieron voluntariamente sus casas y lugares de trabajo para instalar SBC desarrollados por el SIATA para medir la contaminación atmosférica en el Valle de Aburrá. Los SBC están contenidos en una estructura que se asemeja a una nube, lo cual es parte de la estrategia de comunicación para atraer a los ciudadanos a participar y alojar y cuidar una nube. El SIATA se enfoca en la gestión del riesgo y su objetivo es aumentar los niveles de educación y la apropiación del conocimiento en diferentes grupos objetivo, principalmente niños y adolescentes. La red de Ciudadanos Científicos tiene 300 nubes que complementan a la red de monitoreo de calidad de aire del AMVA de grado regulatorio, lo que aumenta la resolución geográfica y social de la información de calidad de aire existente.

La red de SBC mide PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, temperatura y humedad relativa y los datos se proveen en tiempo real en la página web del SIATA. El proyecto tiene también una aplicación en versiones IOS y Android donde los datos pueden ser consultados en visualizaciones amigables para el usuario. Cada nube contiene dos sensores de material particulado (PM por sus siglas en inglés) así que las mediciones son redundantes. Ambos sensores están conectados a un dispositivo Raspberry Pi que envía la información a los servidores del SIATA usando la conexión Wi-Fi del ciudadano². El número de ciudadanos seleccionados para convertirse en Ciudadanos Científicos depende de los recursos disponibles de la autoridad ambiental y los patrocinadores en el momento. El proyecto ha mejorado el conocimiento de los participantes sobre problemas meteorológicos, tecnológicos y científicos. También ha empoderado a ONGs y a apropiado a

¹ CEC, 2020.

² Ibid.

los individuos del conocimiento de la contaminación del aire y de sus soluciones, a la vez que le ha permitido a las autoridades ambientales monitorear la distribución de PM₁₀ y PM_{2.5} en el área metropolitana, tanto durante episodios críticos de contaminación como en sus niveles diarios, así como proveer aportes a la investigación científica y al desarrollo de tecnología.

Hay muchos otros ejemplos de redes de SBC que están operando de manera exitosa en la actualidad alrededor del mundo. Por ejemplo, la **red Purple Air** ofrece SBC a ciudadanos, colegios y otras instituciones para medir PM₁, PM_{2.5}, y PM₁₀ y es una de las redes de SBC más densas en el mundo. Los datos reportados por los equipos están disponibles en su página web en mapas interactivos. Otro ejemplo que también provee mapas interactivos en línea es Sensor Community. La red funciona con la información de los participantes y que empezó en Stuttgart, cuenta actualmente con más de 13.000 equipos en más de 75 países.

El uso de los SBC está haciendo posible un cambio de paradigma en el monitoreo de la calidad del aire, donde redes híbridas de instrumentos de grado regulatorio a la par con monitoreo ciudadano o comunitario, está cerrando brechas de información en las redes de monitoreo y aumentando la conciencia sobre los problemas de calidad del aire e involucrando activamente a grupos de ciudadanos en discusiones locales. Breathe London y la red de Ciudadanos Científicos son ejemplos exitosos del uso de SBC para lograr estos objetivos.

El Uso y la Comunicación de los Datos de Sensores de Bajo Costo

A pesar de que los SBC han sido muy útiles para aplicaciones donde cierran brechas de información y aumentan la conciencia sobre los problemas de calidad de aire, entre otros usos, estos no tienen la capacidad de reemplazar a los Instrumentos de Grado Regulatorio y no pueden ser utilizados para el monitoreo regulatorio debido a la calidad de los datos que reportan. Los SBC tienen incertidumbres que actúan como una posible barrera para la toma de decisiones efectiva³. Es por esto que es importante que los usuarios entiendan las limitaciones de los SBC y de la información que proveen. Es recomendable siempre incluir las limitaciones e incertidumbre de los datos reportados y compartir los detalles sobre cómo se recolectaron y procesaron los datos y si hubo procesos de aseguramiento de calidad. El objetivo es proveer información al público sobre cómo se pueden utilizar e interpretar los datos, para que exista transparencia para potenciales nuevos usuarios y para construir confianza alrededor de esta nueva tecnología.

³ deSouza, P., et.al., 2022.

Consideraciones Técnicas y Desempeño de los Sensores de Bajo Costo

Los SBC presentan diferentes desafíos en cuanto a su desempeño y la calidad de los datos obtenidos. Tanto los SBC que detectan gases como los que detectan partículas tienen limitaciones, no solamente debido a su sensibilidad a condiciones ambientales, si no también debido a sus características particulares de operación o incluso al mal manejo por parte del usuario. A continuación, se presenta una visión general sobre los aspectos que afectan la respuesta de los SBC.

Consideraciones Técnicas

Antes de entrar a mirar los aspectos técnicos de operación de los SBC, es importante aclarar la terminología que se usa comúnmente para referirse a los SBC y a sus componentes, en pro de avanzar hacia una homologación de la terminología utilizada. Este documento utilizará las definiciones de la OMM así: “Sensor se refiere al subcomponente de tecnología básico que realiza la medición analítica de un contaminante del aire o de parámetros meteorológicos como la temperatura y la humedad”.

En el caso de los sensores de contaminantes, normalmente la presencia de un gas o de una partícula se convierte a una señal eléctrica que puede relacionarse a la concentración atmosférica de acuerdo a la magnitud relativa de la señal. Un sensor necesita subcomponentes adicionales para ser desplegado (tales como una fuente de energía y un procesador). Un término adicional usado en la literatura es un sistema sensor (también conocido como sensor de aire IOT, sensor ambiental, SBC, o sensor de aire), que es un dispositivo que integra uno o más subcomponentes y otros componentes de soporte que conforman un sistema de detección autónomo. Un sistema sensor puede incluir componentes que residen de forma remota con respecto al sensor, como un sistema de transferencia de datos remoto o procesamiento de datos⁴. Este documento usa el término SBC para referirse a un sistema sensor.

Para el caso de los SBC de PM, la mayoría usa técnicas de medición ópticas. Las mediciones derivadas de un sensor óptico pueden variar con respecto a métodos de medición directos de concentración de masa (i.e., el muestreo gravimétrico que es el estándar usado en Instrumentos de Grado Regulatorio⁵). Los sensores ópticos detectan una señal de dispersión de luz y convierten esa información a número de partículas y masa para estimar concentraciones e incluso diámetros de partículas. Este método se usa comúnmente en los SBC porque tiene un tiempo de respuesta más corto y menores requerimientos de energía. Pero las características de las partículas pueden tener gran variabilidad en mediciones en campo y eso introduce un potencial de error en las mediciones. Adicionalmente la distribución del tamaño de partícula del aerosol, la forma, su índice de refracción, higroscopicidad, volatilidad, densidad y otros parámetros químicos y físicos pueden influenciar el proceso de dispersión de luz. Estos parámetros son muy variables en microambientes con diversas fuentes de PM y pueden modificar la concentración de

⁴ WMO, 2021.

⁵ El término Instrumento de Grado Regulatorio se usará en este documento para referirse a los instrumentos que usan métodos de referencia o métodos equivalentes que cumplen con los procesos de certificación de estándares y desempeño para la recolección de datos de calidad de aire, utilizados normalmente para el monitoreo regulatorio. La US EPA se refiere a este tipo de instrumentos como Método de Referencia Federal y Método de Referencia Equivalente (FRM/FEM por sus siglas en inglés).

masa reportada por los SBC^{6,7}. Por eso las calibraciones bajo condiciones de campo son cruciales, incluso si el fabricante del SBC provee calibraciones de fábrica.

Otra característica intrínseca de un sensor es su longitud de onda. La longitud de onda de la luz del láser del sensor es importante porque esta determina los diámetros de partícula que el equipo está en capacidad de detectar. Los SBC tienden a tener un bajo desempeño en escenarios de baja contaminación⁸ porque generalmente sus sensores no están en capacidad de detectar diámetros alrededor de (y menores que) 0.3 μm . Sin embargo, las partículas por debajo de ese tamaño son de interés en la recolección de datos de calidad de aire, lo cual es una desventaja de la tecnología de SBC.

Los SBC que miden gases también tienen sus desafíos propios. Los sensores electroquímicos o de óxido de metal pueden tener interferencias con gases diferentes al contaminante objetivo y también se ven afectados por la temperatura y la humedad. Adicionalmente los sensores de gases pierden reactividad gradualmente y deben ser reemplazados relativamente rápido, comúnmente después de un año. Los fabricantes de SBC de gases proveen tanto una vida útil de estantería (i.e., el tiempo entre la fabricación y la operación inicial) y una vida útil operacional (i.e., el tiempo entre su primer uso y el momento en el cual ya no será apto para su propósito). La vida útil de estantería puede ser típicamente de alrededor de 6 meses cuando se almacenan bajo condiciones ideales. Algunos sensores solo pueden ser utilizados por 1 o 2 años. Estos tiempos combinados se conocen como el envejecimiento del sensor. El envejecimiento de los SBC puede estar entre 6 meses a 3 años. El envejecimiento también es un desafío para los sensores de PM y este sucede incluso si no está siendo utilizado. Adicionalmente, los sensores que se exponen a altas concentraciones de humo pueden fallar más rápidamente⁹.

Una fuente adicional de error en la información de un SBC puede ser introducido por el usuario y ocurre cuando el este se despliega para objetivos que no están incluidos en las especificaciones del fabricante (v.g., cuando se usa un SBC de interiores para mediciones en exteriores o se usa en recolección móvil uno de recolección de datos fijos o estacionarios). Por eso es importante adherirse a las especificaciones del fabricante. Como una aclaración, las recomendaciones en este documento se enfocan principalmente en aplicaciones en ubicaciones fijas en exteriores, a menos que se especifique lo contrario.

En cuanto a las condiciones ambientales que afectan el desempeño de los SBC, un factor que influye el tamaño de las partículas es la humedad relativa. Cuando una partícula no es desecada por el instrumento, previo a la estimación de la masa, la humedad relativa puede causar crecimiento higroscópico de las partículas, lo que puede generar una sobre estimación de la masa¹⁰. Como se mencionó previamente, los SBC ópticos no tienen la capacidad de desecar partículas. Más aun, la humedad relativa puede afectar también el índice de refracción de las partículas a través del humedecimiento, por eso los datos de los SBC deben ser manejados con cautela cuando la humedad relativa es mayor a 75%¹¹. Las temperaturas extremas (bajas o altas) pueden afectar también la repuesta de un SBC. Finalmente, no todos los SBC

⁶ deSouza, P., et al., 2022.

⁷ Raheja, G., et al., 2022.

⁸ Liang, L., 2021.

⁹ Holder, A., et.al., 2022.

¹⁰ deSouza, P., et al., 2022.

¹¹ Liang, L., 2021.

están hechos a prueba de la intemperie. En esos casos el usuario debe proveer un resguardo para proteger el equipo de las condiciones ambientales.

En resumen, la tecnología de SBC es muy sensible a una variedad de parámetros y condiciones que afectan su respuesta y el reporte de las mediciones, por lo cual los datos obtenidos de los SBC tienen que ser manejados con precaución y es imprescindible establecer una curva de calibración por cada sensor que resulta de un test de inter-comparación con una estación de referencia o de grado regulatorio.

Características Relacionadas al Desempeño: Definiciones y Relevancia

Existen varias características relacionadas al desempeño de los SBC que pueden tener un efecto en la calidad de los datos recolectados. Estas características relacionadas al desempeño pueden ser utilizadas para establecer valores para criterios de aceptabilidad, para así poder evaluar el desempeño de un SBC. Como primeros pasos para lograr una implementación exitosa de los SBC es importante entender (a) cuáles son esos criterios, (b) por qué son relevantes y cómo impactan los datos recolectados, (c) cómo se ven influenciados por factores del sensor o del ambiente y (d) cual es el enfoque para corregir potenciales divergencias de datos. Estas características para los SBC se presentan a continuación:

- ❖ **Precisión:** se refiere a la habilidad de un sensor de medir consistentemente la misma concentración en múltiples ocasiones bajo condiciones idénticas. Errores aleatorios o desconocidos pueden introducir dispersión en los datos y eso es lo que describe la precisión. La precisión se expresa normalmente como una desviación estándar, aunque el coeficiente de variación también se utiliza.

La precisión de los datos aumenta a medida que se adquieren datos más frecuentemente sobre un periodo de tiempo. La precisión puede mejorarse promediando datos sin procesar. Esto se debe a que agrupar datos en promedios permite que errores aleatorios se cancelen entre sí, haciendo que los datos promediados resultantes sean más precisos (en el caso en que las mediciones no tengan sesgo – ver Sesgo a continuación). Los datos de múltiples SBC en un mismo lugar pueden también ser agrupados y promediados para incrementar la precisión de la medición combinada. Es importante considerar los periodos de tiempo en los cuales se necesita analizar los datos cuando se agrupan datos. El usuario también debe considerar que al agrupar datos se obtienen menos puntos de información individuales.

El fabricante de un SBC tiene información sobre la precisión reportada para el mismo. Aun así, es importante que los usuarios desarrollen sus propias mediciones de precisión para aumentar la calidad de los datos que ese SBC específico está recolectando. Para determinar la precisión (i.e., para determinar cómo se desempeña un SBC específico y cómo replica mediciones y/o se desvía de las mismas), el SBC puede ser probado para su cero y para una concentración conocida. Para hacer esto, el usuario puede exponer el SBC repetidamente a aire sin contaminante y luego en múltiples ocasiones a una concentración conocida del contaminante objetivo. Esto le permitirá identificar la precisión del sensor.

- ❖ **Sesgo:** Este término se refiere a un error persistente en la concentración reportada por el SBC, que puede ser más baja o más alta que la concentración real del contaminante de interés. Este tipo de

error es repetible, por lo tanto, puede ser identificado tomando múltiples mediciones y comparándolas con las mediciones de un Instrumento de Grado Regulatorio (el cual debe estar localizado muy cerca del SBC). El sesgo será un valor constante que tendrá que ser sumado o restado de los datos recolectados para obtener la concentración real (i.e., la concentración medida por el Instrumento de Grado Regulatorio).

El sesgo puede ser causada por el mismo SBC, por un problema con el método de medición o por un error humano del operador del SBC, quien podría estar cometiendo un error persistente para cada medición¹². El sesgo puede cambiar también en el tiempo por condiciones del ambiente como la temperatura y la humedad, por la vida útil del SBC o por la interferencia de otros químicos presentes en la atmosfera (ver también Deriva a continuación).

Como en el caso de la precisión, el fabricante de un SBC tiene información sobre el sesgo reportado para el mismo, pero es importante que el usuario haga sus propias mediciones de sesgo para aumentar la calidad de los datos que el SBC recolecte. Para corregir por sesgo, es importante llevar a cabo calibraciones frecuentemente y comparar el SBC con un Instrumento de Grado Regulatorio y/o con otros SBC, incluso con algunos que utilicen un método de medición diferente. Cuando las causas del sesgo son problemas con el método de medición o un error humano, alterar el método de medición o corregir los procedimientos operacionales respectivamente, son también alternativas para corregir por sesgo.

- ❖ **Linealidad:** Este término se refiere al grado en el cual las mediciones del SBC pueden relacionarse con lo reportado por un Instrumento de Grado Regulatorio. Esto es de importancia para el proceso de calibración del SBC, donde el usuario buscará un modelo de regresión que pueda describir la relación entre los dos instrumentos, para poder utilizarla para corregir los datos a recolectar. La linealidad se determina comúnmente usando el coeficiente correlación R^2 .

Algo importante a considerar es que R^2 puede ser engañoso si las concentraciones objetivo del proyecto están cerca del límite de detección del SBC (ver Límite de Detección a continuación). Para ese caso, es recomendable utilizar la opción de la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE por sus siglas en inglés)¹³.

- ❖ **Límite de Detección:** Se refiere a la concentración más baja mayor a cero que el sensor puede medir a un nivel de certeza definido. El Límite de Detección del Método (MDL por sus siglas en inglés) se usa con frecuencia y se define como 99% de confianza de que la medición no es ruido¹⁴.

El fabricante de un SBC puede proveer el límite de detección de su SBC. Si el objetivo de la recolección de datos es medir en el límite inferior del rango de concentraciones del contaminante de interés, es muy importante medir el límite de detección frecuentemente, porque puede variar con el tiempo. Puede utilizarse un gas de calibración, diluyéndolo hasta que el SBC ya no pueda medirlo con certeza.

¹² US EPA, 2014.

¹³ deSouza, P., et al., 2022.

¹⁴ US EPA, 2014.

Otra opción útil es comparar las mediciones del SBC con las de un Instrumento de Grado Regulatorio que este midiendo concentraciones de fondo bajas.

Sin embargo, la US EPA no recomienda incluir el límite de detección como un criterio de desempeño y no ha definido aún protocolos de prueba para el límite de detección para SBC, debido a que no han identificado una metodología para medir el límite de detección que pueda generar resultados consistentes y reproducibles para una variedad de SBC.

Existen otros factores que hacen que la interpretación del límite de detección sea desafiante. En el caso del O₃, “algunos sensores no proveen mediciones reales de aire sin contaminante (es decir de concentración cero), lo que hace más difícil la interpretación en el contexto del límite de detección. La mayor parte de fabricantes proporcionan el rango de valores que el equipo puede medir desde cero hasta algún valor positivo (v.g. 0 - 50 ppbv)”¹⁵. En el caso de PM_{2.5}, los SBC no reportan concentraciones negativas como con O₃, reportan cero para concentraciones bajas. “Adicionalmente la respuesta del sensor a concentraciones bajas puede tener una pendiente diferente y/o incertidumbre variable en el rango de concentraciones bajas (0 - 8 µg/m³)”¹⁶.

Aun así, debido a que el límite de detección es una característica que define si las necesidades de medición para un caso específico pueden o no ser provistas por un SBC específico, esta información ha sido incluida en este documento para que sea considerada en cada caso particular. La US EPA recomienda reportar los límites de detección suministrados por el fabricante.

- ❖ **Deriva:** Se refiere a un cambio gradual en la respuesta del SBC (que puede aumentar o disminuir) en el tiempo. La deriva muestra una tendencia en los datos que incrementa o disminuye en el tiempo, pero no refleja un cambio real de las concentraciones ambientales. La deriva puede afectar la exactitud, la precisión y también incrementar el sesgo.

La deriva puede ser causa de una variedad de factores incluyendo las condiciones del clima (como la exposición a aire húmedo o a temperaturas cálidas), envenenamiento del SBC o características internas del SBC, como la pérdida de potencia o de eficiencia en la fuente de luz (para el caso de sensores ópticos).

La deriva se puede abordar calibrando el SBC con frecuencia para que sólo se desvíe una pequeña cantidad entre calibraciones. La frecuencia de calibración dependerá de cuanta deriva ocurra.

- ❖ **Error:** este término mide la discrepancia entre las concentraciones de contaminante reportadas por el SBC y el Instrumento de Grado Regulatorio. El error se puede determinar usando el RMSE y el RMSE normalizada (NRMSE por sus siglas en inglés).

¹⁵ US EPA, 2021.

¹⁶ US EPA, 2021.

Otras características relevantes de los SBC

- ❖ **Integridad de los Datos:** Se refiere a la cantidad de datos válidos que se obtienen vs la cantidad de datos esperados y se expresa como un porcentaje. Las series de datos incompletos pueden interferir con el análisis de la información obtenida por las brechas que se generan, las cuales impiden mantener la continuidad de los datos y la obtención de datos representativos de alta calidad. Las brechas de información pueden ser causadas por problemas en la transmisión de datos debido a una baja confiabilidad de la conexión inalámbrica (en el caso en el que los datos sean transmitidos de forma inalámbrica) o a la pérdida de energía (en cuyo caso también se perderán datos adicionales durante el tiempo requerido para reiniciar el equipo). El tiempo que un SBC está desconectado para reparaciones o calibraciones frecuentes o largas también pueden tener un impacto en la integridad de los datos.
- ❖ **Tiempo de Respuesta:** Este término se refiere al tiempo que le toma a un SBC para responder a un cambio de concentración. Dependiendo de los objetivos del proyecto, puede requerirse un SBC que responda rápidamente (v.g. si se necesita recolectar datos que cambian rápidamente, como en aplicaciones móviles o para plumas de contaminación de vida corta). Para este tipo de casos es recomendable contar con un tiempo de respuesta menor a 1 minuto. Para la detección de calidad de aire en exteriores que cambia gradualmente, una detección cada 10 minutos puede ser suficiente¹⁷. Los fabricantes utilizan el t_{90} (para SBC de tiempo de respuesta rápidos) o t_{50} (para SBC con tiempos de respuesta más lentos). Estos representan el tiempo que le toma al SBC responder para detectar el 90% o el 50% del contaminante que está siendo medido, respectivamente.
- ❖ **Duración de la Medición:** es el tiempo que toma recolectar una medición. Así como con el tiempo de respuesta, una duración de medición más corta permite detectar condiciones que cambian rápidamente. La duración de la medición depende del tiempo de respuesta, entre otros factores.
- ❖ **Frecuencia de Medición:** este término se refiere al número de mediciones recolectadas por unidad de tiempo. La frecuencia de medición depende del tiempo de respuesta del SBC.

Criterios de Selección

Después de haber entendido mejor cómo funcionan los SBC y cuáles son las características relevantes clave de su desempeño, es más sencillo tomar una decisión informada al seleccionar un sensor o un SBC que se ajuste a las necesidades del usuario. El usuario debe haber definido con anterioridad el enfoque de su proyecto, el objetivo del monitoreo y las preguntas guía que quiere responder. Estos aspectos le darán información sobre cuál es el contaminante de interés, cuál será la duración de la recolección de datos, cuáles serán las condiciones en campo, cuál es el nivel de calidad de las mediciones que se requiere y cuál es el tipo de mediciones que se necesitan (i.e., de corto plazo, de largo plazo, estacionarias y/o móviles). Con base en esa información se puede utilizar la siguiente lista de chequeo para evaluar diferentes opciones de SBC y seleccionar la opción que mejor se ajuste al proyecto:

¹⁷ US EPA, 2014.

- ✓ **Método de Medición, Rango de Detección y Límite de Detección:** ¿Cuáles son las concentraciones objetivo del proyecto? ¿El SBC tiene la capacidad de detectar el rango completo de concentraciones esperadas? ¿Qué tipo de medición se necesita (de corto plazo, de largo plazo, estacionaria y/o móvil)? (Ver más detalles en la sección *Características Relacionadas al Desempeño: Definiciones y Relevancia*).
- ✓ **Precisión y Sesgo:** ¿Cuáles son los valores de precisión y sesgo reportados por el fabricante o en la literatura para el SBC a considerar? ¿Cuál es el área de aplicación del proyecto y cuáles son los rangos aceptables para los valores de precisión y error del sesgo? (Ver más detalles en la Tabla 12).
- ✓ **Tiempo de Respuesta:** ¿Qué tan rápido responde el SBC al cambio de condiciones? (Ver más recomendaciones en la sección *Otras características relevantes de los SBC*).
- ✓ **Almacenamiento y Transferencia de Datos:** ¿Los datos se almacenan localmente o en una base de datos mantenida por el fabricante o por un tercero? ¿El formato de almacenamiento de los datos es fácilmente legible?
- ✓ **Facilidad de Uso y de Instalación:** ¿El equipo es fácil de usar? ¿Necesitará proveer sesiones de entrenamiento para su uso? ¿El equipo viene contenido en alguna estructura a prueba de la intemperie?
- ✓ **Disponibilidad Comercial:** ¿El SBC es un producto que aún no está disponible en el mercado?
- ✓ **Envejecimiento del Sensor (Vida útil):** ¿Por cuánto tiempo recolectará datos el proyecto? ¿Será necesario reemplazar los SBC durante la duración del proyecto?
- ✓ **Garantía y Soporte del Producto del Fabricante:** ¿El fabricante ofrece una garantía para el SBC? ¿Ofrece reparación o re-calibración?
- ✓ **Facilidad de Mantenimiento y Costos de Mantenimiento:** ¿El equipo es fácil de mantener? El mantenimiento puede incluir reemplazar filtros y/o baterías, limpiar sensores y superficies internas usando aire comprimido, solucionar problemas de conexión a la red, reemplazar componentes dañados y devolver equipos dañados al fabricante para reparación o re-calibración¹⁸.
- ✓ **Costo:** ¿Comparará solamente el sensor y necesitará subcomponentes adicionales o adquirirá un SBC? ¿Cuántos equipos necesita?

Con respecto a los costos, es importante clarificar que cuando se habla de los SBC, el costo bajo se refiere al costo de compra del equipo y no incluye otros costos adicionales que se requerirán cuando se empiece a utilizar el SBC. Considere si comprará únicamente el sensor y si requiere hardware o subcomponentes adicionales para su despliegue (lo que puede requerir habilidades de programación y soldadura). Identifique y estime costos adicionales de instalación y operación, del diseño e implementación de los procesos de aseguramiento y control de calidad, de mantenimiento como ajustes o reparaciones periódicas y también de almacenamiento, gestión y visualización de los datos (y su software relacionado). Recuerde estimar los costos asociados al personal necesario para apoyar todo ese trabajo. Algunos SBC tienen costos adicionales para el acceso a los datos a través de licencias (ver más en la sección *Consideraciones de los Datos*). Finalmente, tenga en cuenta la cantidad de SBC que va a necesitar (incluya SBC adicionales para reemplazar los que fallen), ya que comprar al por mayor directamente del fabricante

¹⁸ Tracking California, Comité Civico del Valle, and University of Washington, 2018.

puede resultarle más económico. Un recurso útil para la estimación de costos es el reporte de la OMM de 2021, que incluye estimaciones de costos de operación de redes de SBC dependiendo de su tamaño¹⁹.

Probando el Desempeño de un Sensor de Bajo Costo: Protocolos

Al usar SBC la calibración es clave, ya que este proceso relaciona, a través del desarrollo de una curva de calibración, la respuesta del SBC con la de un Instrumento de Grado Regulatorio. Los modelos de calibración se usan normalmente para ajustar por condiciones ambientales como la temperatura, la humedad relativa, el punto de rocío y el sesgo. Debido a todos los factores que pueden afectar las mediciones reportadas por un SBC, es crucial diseñar un procedimiento de calibración como una medida de control de calidad. Incluso aunque algunos SBC tengan información sobre cómo calibrar el equipo o aunque algunos SBC pueden ser adquiridos pre-calibrados, es crítico llevar a cabo calibraciones bajo las condiciones en las cuales el equipo será utilizado. Ya que las condiciones ambientales varían por región, es importante desarrollar modelos específicos para cada caso, en vez de utilizar factores de calibración genéricos o proporcionados por el fabricante²⁰. En todo caso, al adquirir un SBC es importante saber si ha sido calibrado por el fabricante e incluir esa información en el reporte de calibración. El manual del equipo también puede contener información sobre cuánto durará la calibración después de empezar a usar el SBC.

Realizar calibraciones de forma periódica provee disponibilidad de información para producir datos de mayor exactitud y permite identificar y gestionar cambios en el desempeño del SBC durante ese periodo de tiempo. Debido a que el desempeño del SBC puede variar con el tiempo, es recomendable calibrar los SBC en al menos tres instancias diferentes: antes de iniciar la recolección de datos, durante y después de la recolección de un conjunto de datos. Dado que la humedad relativa y la temperatura cambian durante el cambio de estaciones, también es recomendable hacer una nueva calibración justo antes de un cambio de estación, durante la transición entre estaciones y después del cambio de estación²¹.

Un plan de calibración debe prepararse para establecer la programación de las calibraciones. Considere en el plan posibles demoras debido a procedimientos administrativos para adquirir permisos para instalar los SBC cerca de los Instrumentos de Grado Regulatorio.

Los intervalos de tiempo entre calibraciones dependerán del SBC utilizado y del objetivo de la recolección de datos, por lo que puede ser diaria, semanal, trimestral, semi anual o anual. La necesidad de una calibración también puede ser determinada basándose en desviaciones de los criterios de desempeño que sean identificadas durante la recolección de datos (como por ejemplo a medida que un instrumento presente deriva). Algunos usuarios hacen seguimiento a los resultados de los paquetes de código para el análisis de datos y establecen valores específicos de desviación para los criterios de desempeño utilizados con los que hay que tener cuidado. Si varios criterios de desempeño alcanzan esos valores, entonces se inicia una calibración. De lo contrario se siguen las calibraciones establecidas en el plan²². La planificación

¹⁹ WMO, 2021.

²⁰ Liang, L., 2021.

²¹ Retama, A., 2022.

²² C. Hoyos, 2022.

debe tomar en cuenta el envejecimiento de los equipos y su reemplazo para que no se utilicen dispositivos después de que finalicen su vida útil.

Una calibración chequea y ajusta la respuesta del SBC a un valor de referencia conocido (i.e., a una concentración conocida de contaminante). El valor de referencia conocido que es usado para ajustar los valores reportados por el SBC puede obtenerse usando un estándar de referencia o un Instrumento de Grado Regulatorio. En el primer caso, se expone el SBC a un estándar de referencia ampliamente aceptado y se relaciona la respuesta del SBC a la concentración conocida del estándar de referencia. En el segundo caso se compara la respuesta del SBC a la respuesta del Instrumento de Grado Regulatorio, que por definición, ha sido calibrado con un estándar reconocido.

Los estándares de referencia pueden ser obtenidos de proveedores de productos científicos. Para gases, los estándares se venden normalmente en cilindros de gas comprimido. Los estándares de partículas vienen en polvo y necesitan ser re suspendidos en una fuente de aire limpio comprimido antes de la medición. Debido a la naturaleza de estos estándares, los usuarios requieren condiciones de laboratorio para usarlos. Por ejemplo, el O_3 y el NO_2 pueden degradarse muy rápidamente. El O_3 no puede ser entregado en un cilindro y tiene que ser creado por un generador de O_3 en el momento de la calibración. Este equipo puede producir concentraciones conocidas del gas, pero es costoso y puede no estar disponible para todos los usuarios de SBC. En el caso del NO_2 , hay cilindros pequeños con fecha de expiración de un año, pero se degrada rápidamente, como se mencionó. Adicionalmente algunos estándares deben mezclarse con una fuente de aire limpio. En el caso de los estándares de partículas, se requiere equipo sofisticado de laboratorio para preparar las partículas para la medición (v.g., se necesita una medición de referencia o de grado regulatorio para determinar la concentración másica cuando se re suspende; algunos necesitan un pulverizador así como aire de dilución o un difusor de aire seco). De nuevo, estas condiciones pueden ser restrictivas para los usuarios de SBC. Por eso, dependiendo de las condiciones específicas de la recolección de datos, los usuarios pueden considerar hacer la calibración con un instrumento de referencia.

Inter-comparación

Cuando se despliegan varios SBC, es necesario calibrar cada uno de los SBC que se van a utilizar, porque cada uno tendrá una respuesta diferente debido a sus características individuales. Esto ocurre incluso si los SBC son de la misma marca y del mismo lote. Cada SBC debe tener su propia ecuación de calibración que considere una o varias variables.

Como se mencionó anteriormente, los SBC son sensibles a las condiciones ambientales. Para entender la exactitud de los datos producidos por un SBC, las calibraciones deben ser realizadas bajo las mismas condiciones ambientales bajo las cuales se recolectarán los datos (i.e., los rangos de temperatura, humedad, concentraciones, aire de fondo, etc.). Las calibraciones se hacen normalmente operando el SBC simultáneamente con uno o varios Instrumentos de Grado Regulatorio. Este proceso se conoce como inter-comparación. Los conjuntos de datos del SBC y de los Instrumentos de Grado Regulatorio pueden entonces compararse con el objetivo de ajustar la respuesta del SBC.

Para algunos casos, la inter-comparación puede hacerse en el mismo lugar en donde se realizarán las mediciones (i.e., el sitio de calibración es el mismo sitio que será objeto de las mediciones, o está ubicado en el mismo barrio o municipio). En otros casos donde, por ejemplo, el objetivo del proyecto sea recolectar datos en áreas remotas, puede no haber un Instrumento de Grado Regulatorio disponible a una distancia corta. Aun así, estudios han demostrado que cuando algunos conjuntos de datos se corrigen por parámetros relevantes (como la temperatura y la humedad relativa), los valores resultantes pueden ser altamente exactos cuando se comparan con los derivados de los Instrumentos de Grado Regulatorio, principalmente para $PM_{2.5}$. Esto sugiere que los factores de corrección son transferibles entre áreas geográficas con composiciones climatológicas, tamaños de partícula y carga aproximadamente homogéneos²³.

Para el caso del $PM_{2.5}$, al escoger un lugar de inter-comparación, es importante encontrar uno en el que se asemejen las fuentes del contaminante, para que pueda asumirse que las partículas van a tener un rango similar de composiciones. Para esos casos la inter-comparación del Instrumento de Grado Regulatorio debe ser representativa de las condiciones de área de medición objetivo.

La inter-comparación proveerá datos para desarrollar una ecuación de calibración que relacione tan estrechamente como sea posible la respuesta del SBC con las mediciones del Instrumento de Grado Regulatorio. Una vez se obtenga la ecuación de calibración, esta puede ser utilizada en el lugar objetivo, asumiendo que las condiciones están en el mismo rango presente durante el periodo de inter-comparación.

La US EPA ha desarrollado dos protocolos de prueba recomendados para SBC: La Prueba Base y la Prueba Mejorada. La primera se enfoca en pruebas en campo, para exponer el equipo a condiciones ambientales y obtener información del desempeño del SBC en un escenario del mundo real. La segunda se realiza bajo condiciones más controladas, usando una cámara de exposición en laboratorio, y busca evaluar la respuesta del SBC a un rango más amplio de condiciones, que pueden ser más difíciles de encontrar en campo. Esta prueba busca entender mejor la respuesta del SBC a interferentes, temperatura, humedad relativa así como a la deriva y exactitud a concentraciones más altas. La Prueba Mejorada provee información más exhaustiva sobre el desempeño de un SBC ya que las condiciones son conocidas y los resultados son repetibles y reproducibles.

Es importante resaltar que ambos procedimientos de prueba fueron diseñados para aplicaciones de monitoreo en aire ambiente, exterior, fijo, de grado no regulatorio suplementario e informativo, NSIM. Otros escenarios como interiores, exposición personal o monitoreo móvil requiere protocolos que no han sido considerados bajo estas dos alternativas de prueba. La recomendación de la US EPA es realizar al menos la Prueba Base, ya que los requisitos de la Prueba Mejorada pueden no ser fáciles de conseguir.

²³ Raheja, G., et al., 2022. A Network of Field-Calibrated Low-Cost Sensor Measurements of $PM_{2.5}$ in Lomé, Togo, Over One to Two Years. *ACS Earth and Space Chemistry* 6 (4), 1011-1021. DOI: 10.1021/acsearthspacechem.1c00391

Consideraciones de los Datos

Cuando se usa un SBC se recomienda que las mediciones sean registradas internamente en el SBC o a través de un sistema de adquisición de datos central y no tener el SBC conectado a internet. Esto es para prevenir la pérdida de datos en caso de que falle la conexión a internet o la red. Esto también es útil en casos donde los SBC se van a desplegar en áreas remotas donde no hay internet o acceso a redes de celular. Adicionalmente algunos SBC utilizan mediciones cercanas para verificar su operación o corregir datos. En esos casos es útil que el usuario pueda determinar cómo es el desempeño del SBC cuando no tiene acceso a la red. Finalmente “es difícil verificar la integridad de los datos si el SBC está conectado a internet (v.g. el firmware podría actualizarse durante la prueba). Muchos usuarios requieren la habilidad de tener trazabilidad y verificar como se transforman los datos sin procesar a datos finales. Esto puede ser especialmente problemático para SBC que dependen de algoritmos de inteligencia artificial o aprendizaje automático”²⁴.

Algunos SBC no pueden operar sin una conexión a internet o no pueden registrar datos internamente. La selección de un SBC debe estudiarse cuidadosamente bajo estas consideraciones, dependiendo de los objetivos del proyecto y de los lugares objetivo. Para los SBC con requerimientos de conexión celular o de internet, esta información debe ser incluida en los reportes y no se deben utilizar datos de instrumentos inter-comparados o monitores cercanos para manipular el procedimiento de procesamiento de datos para las pruebas ni para los reportes.

Adicionalmente, el usuario debe garantizar que los datos del SBC y del Instrumento de Grado Regulatorio utilizado estén alineados en el tiempo. Esto permitirá comparar las mediciones apropiadamente. Recuerde examinar al SBC y al Instrumento de Grado Regulatorio para el contaminante objetivo, para contaminantes interferentes, para temperatura y para humedad relativa. Esto puede hacerse utilizando un data logger. Si esto no está disponible, ajuste los tiempos de los instrumentos a un reloj estándar común y/o revise los tiempos cuando los equipos sean iniciados y detenidos.

Finalmente es de importancia cuando los datos se reportan como un promedio, tener claridad en si el promedio es de tiempo final o de tiempo inicial. “Por ejemplo, al registrar promedios horarios el tiempo 07:00 puede reflejar datos recolectados entre 06:01 – 07:00 (tiempo final) o 7:00 – 7:59 (tiempo inicial)”²⁵.

Una recomendación final en términos de accesibilidad de los datos es considerar las licencias necesarias para la visualización de datos y el número de usuarios que estas licencias permiten. Algunos SBC pueden requerir licencias para acceder a los datos, lo que a su vez, puede convertirse en una dificultad si varias instituciones o partes interesadas están colaborando y necesitan acceso simultaneo a los datos recolectados. Por eso, antes de elegir un SBC, siempre revise si hay requerimientos de licencias y determine si el presupuesto del proyecto permitirá costearlas.

²⁴ US EPA, 2021. p.7.

²⁵ US EPA, 2021. p.7-8.

Prueba Base

La prueba base debe realizarse en dos (2) despliegues en campo usando al menos tres (3) SBC de la misma marca, modelo y versión de firmware para identificar variaciones entre SBC idénticos. Los SBC deben probarse una vez estén ubicados muy cerca de Instrumentos de Grado Regulatorio (que deben haber sido calibrados previamente) por un periodo de al menos 30 días por despliegue. También se necesitan monitores calibrados de temperatura y humedad relativa para la prueba base.

Los lugares de prueba deben representar el rango de temperaturas, humedad relativa, concentraciones y condiciones climáticas que puedan proveer información sobre cómo será el desempeño de los SBC bajo las condiciones esperadas en el área donde la recolección de datos se va a realizar de acuerdo a los objetivos específicos del proyecto. Los detalles del número de sitios a utilizar se presentan en Tabla 1. Para la prueba base de PM_{2.5}, si los objetivos del proyecto incluyen concentraciones altas (v.g. incendios forestales o humo), se recomienda incrementar el número de sitios de prueba e incluir áreas afectadas por ese tipo de eventos y concentraciones altas de PM_{2.5}.

Tabla 1. Consideraciones para la Selección y Configuración del Lugar para la Prueba Base de PM_{2.5} y O₃

Consideraciones	Material Particulado Fino (PM _{2.5})	Ozono (O ₃)
Número de Sitios y Características	Dos (2) lugares de prueba en diferentes regiones climáticas que provean la mayor variedad posible de variables incluyendo: <ul style="list-style-type: none"> • Concentraciones • Fuentes de partícula • Tipos de partícula • Distribuciones de tamaño de partícula 	Una de dos condiciones: <ul style="list-style-type: none"> • Un (1) sitio de prueba durante dos (2) estaciones diferentes o • Dos (2) sitios de prueba diferentes
Concentraciones Meta Promedio en el sitio por al menos un día	≥ 25 µg/m ³ (promedio diario)	Para un solo sitio de prueba: <ul style="list-style-type: none"> • ≥ 60 ppbv (promedio horario en estación de O₃) • Ninguna (promedio horario en una estación sin O₃) Para dos sitios de prueba diferentes: <ul style="list-style-type: none"> • ≥ 60 ppbv (promedio horario en estación de O₃) • Ninguna (promedio horario en una estación sin O₃)
Promedio de Datos para la evaluación del SBC vs el Instrumento de Grado Regulatorio	Promedios diarios	Promedios horarios
Mediciones Adicionales para la Interpretación de Resultados (opcional)	<ul style="list-style-type: none"> • Distribución de tamaño de partícula 	<ul style="list-style-type: none"> • CO • NO₂ • SO₂

Consideraciones	Material Particulado Fino (PM _{2.5})	Ozono (O ₃)
	<ul style="list-style-type: none"> Composición química de partícula (v.g. carbono, nitrógeno) Índice de refracción 	(a ser realizados por Instrumentos de Grado Regulatorio calibrados)
Configuración del SBC	Montado: <ul style="list-style-type: none"> a una distancia no superior a 20m horizontalmente del Instrumento de Grado Regulatorio expuesto a flujo de aire sin restricciones 	
Localización de la Entrada de Muestreo de Aire del SBC	A una distancia de ±1m verticalmente de la entrada de muestreo de aire del Instrumento de Grado Regulatorio	
Distancia entre SBC	A ~ 1m de distancia	
Protección del SBC de condiciones ambientales	De acuerdo a las recomendaciones del fabricante, instalar protegido del clima, sin afectar el flujo de aire a su alrededor.	
Precauciones para localizar el SBC	No ubique un SBC: <ul style="list-style-type: none"> Cerca de estructuras/objetos que puedan afectar el flujo de aire. Cerca de estructuras/objetos que bloqueen la entrada de aire (v.g., contra una pared, cerca de una salida de ventilación, en el piso bloqueando la entrada de aire). Cerca de estructuras/objetos que puedan altera la temperatura o humedad relativa del sensor (v.g. cerca de una salida de ventilación o de un tubo de escape). Cerca de fuentes o de sumideros que puedan alterar las concentraciones del contaminante (v.g. vehículos encendidos, cerca de fumadores). En lugares con riesgo de vibración, choque eléctrico u otros riesgos potenciales. 	

Adaptado (US EPA, 2021).

La Tabla 1 también incluye mediciones que el usuario puede incluir durante la prueba base. Los datos suministrados por estas mediciones ayudarán al usuario a entender razones físicas para las variaciones en el desempeño del SBC para el caso de PM_{2.5} y también ayudarán al usuario a considerar interferencias, para el caso del O₃. Las mediciones simultáneas adicionales recolectadas para O₃ también pueden ayudar a verificar los resultados de la prueba mejorada.

En cuanto a la selección del sitio, la Tabla 1 incluye las concentraciones a alcanzar durante al menos un día de los 30 días del periodo de la prueba para cada sitio de prueba. Para el PM_{2.5}, el objetivo es seleccionar un sitio de prueba donde una concentración promedio diaria de al menos 25 µg/m³ sea detectable, para ayudar a asegurar que las estadísticas serán comparables a través de los sitios y para evitar obtener un R² bajo debido a los rangos de concentración. Para el caso del O₃, las concentraciones objetivo son de un promedio horario de al menos 60 ppbv (volumen). Esta recomendación toma en cuenta la posibilidad de que concentraciones altas de O₃ puedan ocurrir durante la estación de verano y que por esa razón, los rangos de temperatura disminuyan. En consecuencia, se recomienda hacer una segunda prueba durante una estación diferente o en un sitio diferente para tener un rango más amplio de temperatura. Esto no solo permite incluir condiciones meteorológicas diferentes, si no el potencial de detectar un rango más amplio de otros contaminantes que puedan interferir. Una recomendación

adicional para el O₃ es incluir, si están disponibles, sitios de prueba que presenten episodios de O₃ durante el invierno. La información histórica de concentraciones de los contaminantes y de condiciones meteorológicas que puede ser usada para la selección de los sitios puede estar disponible en redes de monitoreo de aire existentes o a través de autoridades nacionales/locales.

Después de seleccionar el sitio para el protocolo de la prueba base, obtenga el número de identificación y la información de fechas de calibración o certificación de los equipos que se utilicen (incluyendo los Instrumentos de Grado Regulatorio) para el contaminante objetivo, para los contaminantes interferentes y para temperatura y humedad relativa). Incluya una copia de los certificados de calibración en su reporte. Si los Instrumentos de Grado Regulatorio para el contaminante, la temperatura o humedad relativa no han sido instalados previamente en el sitio de prueba seleccionado, ubíquelos de acuerdo a los criterios para entrada de la sonda de muestreo o la ubicación de la trayectoria de muestreo en la Tabla 2.

Tabla 2. Criterios para las Sondas de Muestreo o la Ubicación de las Trayectorias de Monitoreo*

Descripción	Distancia (metros)
Altura desde el suelo	2 to 15
Distancia horizontal y vertical a estructuras de soporte	> 1
Distancia a árboles	> 10**
Distancia a vías	> 10 to 250†

*US EPA, 2021.

** Debe ser mayor a 20 metros desde la línea de goteo del árbol(es) y debe ser 10 metros de la línea de goteo cuando el árbol(es) actúe como un obstáculo (ver 40 CFR Parte 58, Tabla E-4 del Apéndice E).

†El promedio diario de tráfico de la vía, vehículos diarios determinan la distancia mínima (ver 40 CFR Parte 58, Tabla E-1 del Apéndice E).

Pasos para la Prueba Base

A continuación, se presenta una lista paso a paso para la implementación de la prueba base. Por favor referirse a las secciones anteriores para encontrar información detallada y antecedentes sobre algunos de los pasos a continuación²⁶:

1. Seleccione el sitio de prueba requerido de acuerdo a los criterios listados en la Tabla 1.
2. Registre toda la información de la configuración del Instrumento de Grado Regulatorio en los sitios seleccionados, incluyendo:
 - a. Fechas de calibración o de certificación para todos los monitores utilizados (incluyendo Instrumentos de Grado Regulatorio para el contaminante objetivo, para los contaminantes interferentes y para la temperatura y humedad relativa). La calibración de los Instrumentos de Grado Regulatorio se debe realizar después de situar los SBC en su lugar en el sitio, no antes.
 - b. Incluya una copia de los certificados de calibración en su reporte.
 - c. Si se utiliza una red de monitoreo de aire existente, registre el número de identificación del sitio.
3. Verifique que al menos tres (3) SBC se utilicen para la prueba base y que sean de la misma marca, modelo y versión de firmware. Asegúrese de que la versión de firmware no se actualice durante

²⁶ Adapted from US EPA 2021.

- el periodo de prueba. No modifique ninguna de las calibraciones del fabricante y utilice los SBC como fueron recibidos para obtener datos de su desempeño tras ser desempacados y utilizados por primera vez.
4. Guarde los datos de manera local en el SBC o en un data logger desconectando los SBC de internet. Si se requiere una conexión a internet para la operación de los SBC, asegúrese de que no utilicen mediciones de instrumentos cercanos para verificar su operación o para corregir los datos durante el periodo de la prueba base.
 5. Registre la información sobre el equipo y su configuración en el reporte de la prueba base incluyendo:
 - a. Parámetros medidos y unidades (v.g. contaminante(s), temperatura, humedad relativa, punto de rocío).
 - b. Intervalo de tiempo de la medición (v.g., 1-minuto, 15-minutos, 1-hora, 24-horas).
 - c. Almacenamiento de datos (v.g., tarjeta de datos local, sistema en la nube).
 - d. Métodos de transmisión de datos, si aplica (v.g., servidor en la nube del fabricante).
 - e. Formato de los datos almacenados (v.g., datos sin procesar, datos corregidos o limpios).
 - f. Enfoque de la corrección de datos (si aplica) incluyendo:
 - i. Procedimiento utilizado para corregir los datos incluyendo:
 - cómo se corrigen los datos (v.g., corrección multilínea desarrollada por el fabricante),
 - variables utilizadas para corregir los datos (v.g., humedad relativa, temperatura),
 - de donde vienen la(s) variable(s) de corrección (v.g., sensor de humedad relativa incorporado) y
 - cómo se validan o calibran los datos (v.g., el sensor de humedad relativa es calibrado por el fabricante).
 - ii. Si el método de corrección de datos es estático y no cambia, registre esta información y cualquier enfoque matemático utilizado.
 - iii. Si el método de corrección de datos es un proceso dinámico registre lo siguiente:
 - cuándo y por qué cambia el proceso,
 - cómo/dónde se registran los cambios y
 - cómo se valida el método de corrección.
 - g. Guiones de análisis/guiones de corrección (v.g., Jupyter Notebook, R Markdown).
 - h. Ubicación de los datos finales reportados y su formato (v.g., los datos se suministran como .csv, el sitio de web muestra datos sin procesar y corregidos en la interfaz del usuario, definiciones ampliadas de encabezados de datos).
 6. Instale los SBC en el sitio de prueba seleccionado de acuerdo a las recomendaciones en la Tabla 1.
 7. Tome fotos que muestren la configuración de los equipos en cada sitio de prueba y reporte las distancias en el reporte de la prueba base.
 8. Verifique que la adquisición y almacenamiento de datos recolecte y almacene los datos de todos los equipos en un formato al que se pueda acceder después. Verifique que la capacidad de almacenamiento es suficiente para prevenir que datos antiguos sean reemplazados y que permita a la vez guardar los datos de la prueba base.

9. Proporcione un periodo de calentamiento y estabilización para todos los equipos (de acuerdo a las especificaciones del fabricante).
10. Confirme que todos los equipos están reportando mediciones.
11. Realice un chequeo de verificación de flujo puntual (para $PM_{2.5}$), o chequeo de control de calidad puntual (para O_3) en los Instrumentos de Grado Regulatorio y registre la fecha del chequeo.
12. Permita que todos los equipos funcionen durante el mismo periodo de tiempo, durante al menos 30 días consecutivos para obtener resultados comparables.
13. Siga las recomendaciones de mantenimiento del fabricante para todos los equipos durante la prueba base. Registre y reporte todo el mantenimiento y problemas y soluciones realizadas a los equipos incluyendo fechas y horas (v.g., ciclo de potencia, chequeos de verificación de flujo del Instrumento de Grado Regulatorio, chequeos de control de calidad del Instrumento de Grado Regulatorio).
14. Registre y reporte las razones por las cuales existan datos faltantes o no validados. Durante los 30 días consecutivos de la prueba base, es ideal que todos los instrumentos tengan un tiempo de actividad de reporte de al menos el 75%.
 - a. Para $PM_{2.5}$, esto corresponde a que todos los equipos reporten al menos 23 pares de datos diarios que correspondan temporalmente durante el transcurso de los 30 días de despliegue.
 - b. Para O_3 , esto corresponde a que todos los equipos reporten al menos 540 pares de datos horarios que correspondan temporalmente durante el transcurso de los 30 días de despliegue (720 horas en total).
 - c. Si un SBC falla de forma irreparable antes de completar el despliegue de 30 días, no se debe sustituir con otro SBC. Adicionalmente el SBC no debe ser enviado de regreso al fabricante para reparación sin haber reiniciado la prueba. Un reporte preliminar podría presentar resultados con documentación explicando las razones por las cuales el SBC falló. La prueba puede reiniciarse con los tres (3) SBC.
 - d. En algunas ocasiones un tiempo de actividad bajo o un despliegue de menos de 30 días puede ocurrir debido a situaciones imprevistas (v.g., un corte de electricidad o un evento climatológico como un huracán o un tornado). En esos casos las fechas y razones por las cuales hacen falta datos deben ser registradas. Idealmente en estos escenarios la prueba continuaría/se reestablecería hasta que:
 - i. Se recolecten al menos 540 pares de datos horarios que correspondan temporalmente para O_3 . Si los datos de algún equipo no están disponibles durante cada periodo horario de muestreo, registre y reporte la razón.
 - ii. Se recolecten al menos 23 pares de datos diarios que correspondan temporalmente para $PM_{2.5}$. Si los datos de algún equipo no están disponibles durante cada periodo diario de muestreo, registre y reporte la razón.
 - e. Adicionalmente si algún dato es invalidado debido a criterios de control de calidad registre la razón y el criterio utilizado. Los Instrumentos de Grado Regulatorio tienen más criterios de control de calidad establecidos. Los criterios de control de calidad de los SBC pueden estar disponibles a través del fabricante o pueden desarrollarse como parte de estas pruebas.
15. Seleccione el siguiente sitio para el segundo despliegue de acuerdo a los criterios listados en la Tabla 1.

16. Repita los pasos para la prueba base para el segundo despliegue en campo usando los SBC del primer despliegue en campo de ser posible. Genere un reporte de prueba base independiente para el segundo despliegue.

Prueba Mejorada

El objetivo del protocolo de la prueba mejorada es determinar la respuesta del SBC a condiciones ambientales debidas a:

- (a) Temperatura,
- (b) Humedad relativa,
- (c) Interferentes (si aplica)
- (d) Deriva (i.e., cambios en la respuesta del SBC con el tiempo) y
- (e) Concentraciones altas.

La prueba mejorada debe realizarse usando al menos tres (3) SBC de la misma marca, modelo y versión de firmware para identificar variaciones entre SBC idénticos en una cámara de exposición que controle las condiciones ambientales. Los SBC deben probarse inter-comparados con Instrumentos de Grado Regulatorio (que deben haber sido calibrados previamente). También se necesitan monitores calibrados de temperatura y humedad relativa para la prueba mejorada. Los rangos recomendados de las temperaturas, humedades relativas (HR) y concentraciones que la cámara de exposición debería poder controlar, mantener y monitorear se presentan en la Tabla 3. El reporte de la prueba mejorada debe incluir especificaciones de la cámara, sus características y cualquier comparación entre laboratorios.

Tabla 3. Consideraciones para la configuración de la prueba mejorada para PM_{2.5} y O₃

Consideraciones	Material Particulado Fino (PM _{2.5})	Ozono (O ₃)
Rangos de la Cámara de Exposición	<ul style="list-style-type: none"> • T: 19 - 41°C • HR: 35 - 90% • PM_{2.5}: 5 - 280 µg/m³. 	<ul style="list-style-type: none"> • T: 19 - 41°C • HR: 35 - 90% • O₃: 10 a 140 ppbv • CO: 30 a 40 ppmv • NO₂: 90 a 115 ppbv • SO₂: 65 a 85 ppbv.
Capacidades de la Cámara de Exposición (Generales)	<ul style="list-style-type: none"> • Habilidad de mantener la presión atmosférica mediante el balance del flujo entrante con el flujo de muestreo y el flujo de ventilación. • Permite una buena mezcla del aire. • Capacidad de contener 3 SBC o más. • Los puertos de muestreo no deben estar obstruidos y debe permitir flujo de muestreo suficiente. 	
Capacidades de la Cámara de Exposición (Específicas)	<ul style="list-style-type: none"> • Habilidad de mantener la distribución del tamaño de partícula, composición y concentración. • El sistema de generación de partículas debe estar ubicado encima de la cámara de 	<ul style="list-style-type: none"> • La tubería no reactiva o apaciguada que conecta la cámara con el Instrumento de Grado Regulatorio debe ser corta para no afectar lo que se está muestreando.

Consideraciones	Material Particulado Fino (PM _{2.5})	Ozono (O ₃)
	<p>exposición y conectado con el menor número posible de curvas para prevenir la pérdida de partículas y su acumulación antes de que entren a la cámara.</p> <ul style="list-style-type: none"> Los Instrumentos de Grado de Referencia de PM_{2.5} deben estar ubicados directamente debajo de la cámara de muestreo para reducir la pérdida de partículas en la línea de muestreo debido a curvas. 	<ul style="list-style-type: none"> Contar con paredes no reactivas o apaciguadas.
Mediciones Adicionales para la Interpretación de Resultados	<ul style="list-style-type: none"> Distribución de tamaño de partícula Composición química de partícula (v.g. carbono, nitrógeno) Índice de refracción 	<ul style="list-style-type: none"> CO NO₂ SO₂ <p>(a ser realizados por Instrumentos de Grado Regulatorio calibrados)</p>

Adaptado (US EPA, 2021).

Pasos para la Prueba Mejorada

A continuación, se presenta una lista paso a paso para la implementación de la prueba mejorada. Por favor referirse a las secciones anteriores para encontrar información detallada y antecedentes sobre algunos de los pasos a continuación²⁷:

1. Verifique que todos los equipos que serán utilizados están debidamente calibrados. Registre fechas de calibración o certificación para los equipos utilizados (incluyendo Instrumentos de Grado Regulatorio para el contaminante objetivo, para los contaminantes interferentes y para la temperatura y humedad relativa).
2. Incluya una copia de los certificados de calibración en su reporte.
3. Realice un chequeo de verificación de flujo puntual (para PM_{2.5}), o chequeo de control de calidad puntual (para O₃) en los Instrumentos de Grado Regulatorio y registre la fecha del chequeo.
4. Verifique que al menos tres (3) SBC se utilicen para la prueba mejorada y que sean de la misma marca, modelo y versión de firmware. Asegúrese de que la versión de firmware no se actualice durante el periodo de prueba. No modifique ninguna de las calibraciones del fabricante y utilícelos como fueron recibidos para obtener datos de su desempeño tras ser desempacados y utilizados por primera vez. Los SBC pueden ser los mismos utilizados durante la prueba base.
5. Guarde los datos de manera local en el SBC o en un data logger desconectando los SBC de internet. Si se requiere una conexión a internet para la operación de los SBC, asegúrese de que no utilicen mediciones de instrumentos cercanos para verificar su operación o para corregir los datos durante el periodo de la prueba mejorada.

²⁷ Adaptado de US EPA 2021.

6. Registre la información sobre el equipo y su configuración en el reporte de la prueba mejorada incluyendo:
 - a. Parámetros medidos y unidades (v.g. contaminante(s), temperatura, humedad relativa, punto de rocío).
 - b. Intervalo de tiempo de la medición (v.g., 1-minuto, 15-minutos, 1-hora, 24-horas).
 - c. Almacenamiento de datos (v.g., tarjeta de datos local, sistema en la nube).
 - d. Métodos de transmisión de datos, si aplica (v.g., servidor en la nube del fabricante).
 - e. Formato de los datos almacenados (v.g., datos sin procesar, datos corregidos o limpios).
 - f. Enfoque de la corrección de datos (si aplica) incluyendo:
 - i. Procedimiento utilizado para corregir los datos incluyendo:
 - cómo se corrigen los datos (v.g., corrección multilínea desarrollada por el fabricante),
 - variables utilizadas para corregir los datos (v.g., humedad relativa, temperatura),
 - de dónde vienen la(s) variable(s) de corrección (v.g., sensor de humedad relativa incorporado) y
 - cómo se validan o calibran los datos (v.g., el sensor de humedad relativa es calibrado por el fabricante).
 - ii. Si el método de corrección de datos es estático y no cambia, registre esta información y cualquier enfoque matemático utilizado.
 - iii. Si el método de corrección de datos es un proceso dinámico registre lo siguiente:
 - cuándo y por qué cambia el proceso,
 - cómo/dónde se registran los cambios y
 - cómo se valida el método de corrección.
 - g. Guiones de análisis/guiones de corrección (v.g., Jupyter Notebook, R Markdown).
 - h. Ubicación de los datos finales reportados y su formato (v.g., los datos se suministran como .csv, el sitio de web muestra datos sin procesar y corregidos en la interfaz del usuario, definiciones ampliadas de encabezados de datos).
7. Proporcione un periodo de calentamiento y estabilización para todos los equipos (de acuerdo a las especificaciones del fabricante).
8. Confirme que todos los equipos están reportando mediciones.
9. Para el PM_{2.5}, documente la distribución del tamaño de partícula y la composición química de las partículas utilizados en el sistema generador de aerosol.
10. Siga las recomendaciones de mantenimiento del fabricante para todos los equipos durante la prueba mejorada. Registre y reporte todo el mantenimiento y problemas y soluciones realizadas a los equipos incluyendo fechas y horas (v.g., ciclo de potencia, chequeos de verificación de flujo del Instrumento de Grado Regulatorio, chequeos de control de calidad del Instrumento de Grado Regulatorio).
11. Condiciones Iniciales de Prueba
 - a. Ajuste la cámara de exposición a las condiciones en la Tabla 4.
 - b. Permita que todas las mediciones se establezcan dentro de los rangos en la Tabla 4.

- c. Una vez estabilizada recolecte un mínimo de 20 - 30 pares de pares de datos que correspondan temporalmente entre el SBC y el Instrumento de Grado Regulatorio o tres (3) horas consecutivas²⁸ para:
 - i. Concentraciones de PM_{2.5} (µg/m³) o de O₃ (ppbv) de cada SBC.
 - ii. Concentraciones de PM_{2.5} (µg/m³) o de O₃ (ppbv) del Instrumento de Grado Regulatorio.
 - iii. HR (%)
 - iv. Temperatura (°C)

Tabla 4. Condiciones Iniciales de Prueba para PM_{2.5} y O₃

Parámetro	Material Particulado Fino (PM _{2.5})	Ozono (O ₃)
Concentración	35 µg/m ³ ± 5%	70 ppbv ± 5%
Temperatura (T)	20°C ± 1°C	
Humedad Relativa (HR)	40% ± 5%	

Adaptado (US EPA, 2021).

12. Efecto de Interferentes:

Para O₃, siga los siguientes pasos para evaluar el efecto de la presencia de CO, NO₂, y SO₂ en el desempeño de los SBC:

- a. Repita los pasos del numeral 11, Condiciones Iniciales de Prueba.
- b. Después de alcanzar el estado estable (de acuerdo a lo descrito en la Tabla 4), suministre un solo contaminante interferente a la cámara de exposición en la concentración en la Tabla 5. Ajuste el escape para prevenir la acumulación de presión a medida que el caudal total de gas a la cámara cambia.
- c. Permita que todas las mediciones se estabilicen y que la concentración de contaminante interferente alcance los niveles dentro de los rangos descritos en la Tabla 5.
- d. Una vez estabilizada recolecte un mínimo de 20 - 30 pares de pares de datos que correspondan temporalmente entre SBC y el Instrumento de Grado Regulatorio o tres (3) horas consecutivas para:
 - i. Concentraciones de O₃ (ppbv) de cada SBC.
 - ii. Concentraciones de O₃ (ppbv) del Instrumento de Grado Regulatorio.
 - iii. Concentraciones del interferente (ppbv or ppmv).
 - iv. HR (%)
 - v. Temperatura (°C)
- e. Limpie la cámara de exposición con aire limpio hasta que la concentración de interferente sea cero ppbv or ppmv.

²⁸ "Un par de instrumentos de alta resolución (SBC e Instrumento de Grado Regulatorio reportando ambos en promedios de 1 minuto) pueden recolectar 20 o más pares de datos que correspondan temporalmente de forma rápida, minimizando así el costo y la duración de la prueba. Una cámara que use un Instrumento de Grado Regulatorio que solo reporte datos promedio horarios necesitaría un día para recolectar 20 pares de datos que correspondan temporalmente, pero mantener condiciones de estado estable por tanto tiempo sería extremadamente difícil, si no imposible. Sin embargo, 3 pares de datos que correspondan temporalmente (3 horas de prueba) proveerían un número de datos mínimo para un análisis estadístico. Los usuarios deben recolectar tantos pares de datos que correspondan temporalmente como sea posible bajo las limitaciones de la configuración de la prueba, con la sugerencia de que 20 – 30 pares de datos que correspondan temporalmente sería un conjunto de datos ideal." (US EPA, 2021).

- f. Repita los pasos 12.a hasta 12.e bajo la sección **Pasos para la Prueba Mejorada**, para cada contaminante interferente presentado en la Tabla 5.

Tabla 5. Concentraciones de Prueba de Contaminantes Interferentes

Contaminante Interferente	Punto de Referencia
CO	35 ppmv ± 5%
NO ₂	100 ppbv ± 5%
SO ₂	75 ppbv ± 5%

US EPA, 2021.

13. Efecto de Humedad Relativa Elevada:

- Repita los pasos en el numeral 11 Condiciones Iniciales de Prueba en la sección Pasos para la Prueba Mejorada.
- Sumínístrele a la cámara de exposición las condiciones en la Tabla 6.
- Permita que todas las mediciones se estabilicen dentro de los rangos descritos en la Tabla 6.
- Una vez estabilizada recolecte un mínimo de 20 - 30 pares de pares de datos que correspondan temporalmente entre el SBC y el Instrumento de Grado Regulatorio o tres (3) horas consecutivas para:
 - Concentraciones de PM_{2.5} (µg/m³) o de O₃ (ppbv) de cada SBC.
 - Concentraciones de PM_{2.5} (µg/m³) o de O₃ (ppbv) del Instrumento de Grado Regulatorio.
 - HR (%)
 - Temperatura (°C)

Tabla 6. Condiciones de Prueba para Humedad Relativa Elevada para PM_{2.5} y O₃

Parámetro	Material Particulado Fino (PM _{2.5})	Ozono (O ₃)
Concentración	35 µg/m ³ ± 5%	70 ppbv ± 5%
Temperatura (T)	20°C ± 1°C	
Humedad Relativa (HR)	85% ± 5%	

Adaptado (US EPA, 2021).

14. Efecto de Temperatura Elevada:

- Repita los pasos en el numeral 11 Condiciones Iniciales de Prueba en la sección Pasos para la Prueba Mejorada.
- Sumínístrele a la cámara de exposición las condiciones en Tabla 7.
- Permita que todas las mediciones se estabilicen dentro de los rangos descritos en la Tabla 7.
- Una vez estabilizada recolecte un mínimo de 20 - 30 pares de pares de datos que correspondan temporalmente entre el SBC y el Instrumento de Grado Regulatorio o tres (3) horas consecutivas para:
 - Concentraciones de PM_{2.5} (µg/m³) o de O₃ (ppbv) de cada SBC.

- ii. Concentraciones de PM_{2.5} (µg/m³) o de O₃ (ppbv) del Instrumento de Grado Regulatorio.
- iii. HR (%)
- iv. Temperatura (°C)

Tabla 7. Condiciones de Prueba para Temperatura Elevada para PM_{2.5} y O₃

Parámetro	Material Particulado Fino (PM _{2.5})	Ozono (O ₃)
Concentración	35 µg/m ³ ± 5%	70 ppbv ± 5%
Temperatura (T)	40°C ± 1°C	
Humedad Relativa (HR)	40% ± 5%	

Adaptado (US EPA, 2021).

15. Deriva:

La deriva puede ser evaluada en dos (2) puntos diferentes en el tiempo²⁹. Los SBC son expuestos a diferentes concentraciones bajas y medias del contaminante objetivo durante el Día 1 y se recolectan mediciones. Luego, los SBC se operan por un periodo de 60 días en aire ambiente exterior. Finalmente, los datos envejecidos se recolectan exponiendo los SBC a las concentraciones del Día 1 de mediciones.

- a. En el Día 1, suminístrele a la cámara de exposición las condiciones en la Tabla 8.
- b. Permita que todas las mediciones se estabilicen dentro de los rangos descritos en la Tabla 8.
- c. Una vez estabilizada recolecte un mínimo de 20 - 30 pares de pares de datos que correspondan temporalmente entre el SBC y el Instrumento de Grado Regulatorio o tres (3) horas consecutivas para:
 - i. Concentraciones de PM_{2.5} (µg/m³) o de O₃ (ppbv) de cada SBC.
 - ii. Concentraciones de PM_{2.5} (µg/m³) o de O₃ (ppbv) del Instrumento de Grado Regulatorio.
 - iii. HR (%)
 - iv. Temperatura (°C)
- d. Suminístrele a la cámara de exposición las condiciones en la Tabla 9.
- e. Permita que todas las mediciones se estabilicen dentro de los rangos descritos en la Tabla 9.
- f. Una vez estabilizada recolecte un mínimo de 20 - 30 pares de pares de datos que correspondan temporalmente entre el SBC y el Instrumento de Grado Regulatorio o tres (3) horas consecutivas para:
 - i. Concentraciones de PM_{2.5} (µg/m³) o de O₃ (ppbv) de cada SBC.
 - ii. Concentraciones de PM_{2.5} (µg/m³) o de O₃ (ppbv) del Instrumento de Grado Regulatorio.
 - iii. HR (%)

²⁹ “La deriva de 60 días fue seleccionada para balancear los requerimientos de una longitud de tiempo suficiente para medir deriva potencial sin la necesidad de que fuera innecesariamente agobiante. Puede ser informativo repetir la prueba de deriva a medida que los SBC envejecen para proveer puntos adicionales de datos a intervalos periódicos hasta la vida útil esperada del SBC.” (US EPA, 2021).

- iv. Temperatura (°C)
- g. Opere los SBC por 60 días consecutivos en aire ambiente exterior.
- h. Después del periodo de 60 días, repita los pasos en el numeral 15, Deriva en la sección Pasos para la Prueba Mejorada.

Tabla 8. Condiciones de Prueba de Deriva para Concentraciones Bajas de PM_{2.5} y O₃

Parámetro	Material Particulado Fino (PM _{2.5})	Ozono (O ₃)
Concentración	10 µg/m ³ ± 10%	15 ppbv ± 10%
Temperatura (T)	20°C ± 1°C	
Humedad Relativa (HR)	40% ± 5%	

Adaptado (US EPA, 2021).

Tabla 9. Condiciones de Prueba de Deriva para Concentraciones Medias de PM_{2.5} y O₃

Parámetro	Material Particulado Fino (PM _{2.5})	Ozono (O ₃)
Concentración	35 µg/m ³ ± 5%	70 ppbv ± 5%
Temperatura (T)	20°C ± 1°C	
Humedad Relativa (HR)	40% ± 5%	

Adaptado (US EPA, 2021).

16. Exactitud a Altas Concentraciones:

- a. Sumínístrele a la cámara de exposición las condiciones en la Tabla 10. Para la concentración alta de PM_{2.5}, use la concentración de 150 µg/m³.
- b. Permita que todas las mediciones se estabilicen dentro de los rangos descritos en la Tabla 10.
- c. Una vez estabilizada recolecte un mínimo de 20 - 30 pares de pares de datos que correspondan temporalmente entre el SBC y el Instrumento de Grado Regulatorio o tres (3) horas consecutivas para:
 - i. Concentraciones de PM_{2.5} (µg/m³) o de O₃ (ppbv) de cada SBC.
 - ii. Concentraciones de PM_{2.5} (µg/m³) o de O₃ (ppbv) del Instrumento de Grado Regulatorio.
 - iii. HR (%)
 - iv. Temperatura (°C)
- d. Como una prueba adicional (si el objetivo del proyecto es estudiar concentraciones más altas de PM_{2.5}, como las presentes en condiciones de humo), repita los pasos 16.a al 16.c bajo la sección Pasos para la Prueba Mejorada, utilizando la concentración más alta de PM_{2.5} de 250 µg/m³.

Tabla 10. Prueba a Concentraciones Altas de PM_{2.5} y O₃

Parámetro	Material Particulado Fino (PM _{2.5})	Ozono (O ₃)
Concentración	<ul style="list-style-type: none"> Concentración alta: 150 µg/m³ ± 5% Concentración más alta: 250 µg/m³ ± 5% 	125 ppbv ± 5%
Temperatura (T)	20°C ± 1°C	
Humedad Relativa (HR)	40% ± 5%	

Adaptado (US EPA, 2021).

Criterios para las Características de Desempeño: ¿Cómo Calcularlos?

Después de haber definido algunas de las características de desempeño más relevantes y los protocolos de prueba para recolectar los datos, ahora se presentarán las ecuaciones utilizadas para estimar las características de desempeño. Estas ecuaciones tienen el propósito de ser utilizadas para los datos recolectados bajo los protocolos de las pruebas base y mejorada definidas por la US EPA (ver sección Prueba Base y Prueba Mejorada).

Es importante recordar que para comparar los datos obtenidos de diferentes equipos (i.e., de los SBC, Instrumentos de Grado Regulatorio, sensores de temperatura y humedad relativa), los flujos de datos deben estar alineados temporalmente y debe prestarse especial atención para determinar si los promedios de los datos son de tiempo final o de tiempo inicial (ver más detalles en la sección Consideraciones de los Datos).

Cálculos para el Protocolo de Prueba Base

Promedios Diarios y Horarios (Protocolo de prueba base)

Para los datos reportados como intervalos de tiempo sub-diarios (en el caso de PM_{2.5}) o como intervalos de tiempo sub-horarios (para O₃) por el Instrumento de Grado Regulatorio, los SBC, y los equipos de humedad relativa y temperatura, habrá la necesidad de promediarlos a promedios diarios (para PM_{2.5}) o a promedios horarios (para O₃) (ver Ecuación 1). Lo anterior debido a que para la prueba base, las características de desempeño se calculan con base en datos promedio diarios (24 horas) para PM_{2.5} y de datos promedio horarios para O₃.

De gran importancia es el hecho de que para calcular los promedios, se requiere una integridad de datos del 75%. Eso quiere decir que para PM_{2.5} un SBC que recolecta un dato cada hora, necesitaría al menos 18 mediciones válidas para calcular una concentración promedio de 24 horas válida. Para el caso del O₃, un SBC que recolecte un dato cada 15 minutos necesitaría al menos 3 mediciones válidas.

$$x_{kj} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_{ij}$$

Ecuación 1

donde:

x_{kj} es la medición promediada (ya sea promediado diario u horario) k para el día u hora correspondiente y el instrumento j ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$ o ppbv para O_3 , °C, %HR)

n es el número de mediciones del equipo por periodo de tiempo

c_{ij} es la medición del equipo j para el tiempo i del periodo de tiempo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$ o ppbv para O_3), °C, %HR)

Promedios de Despliegue (Protocolo de prueba base)

Las concentraciones promedio de despliegue y los parámetros meteorológicos para el protocolo de la prueba base deben ser reportados también, calculándolos de datos promedio válidos (ya sea promedios diarios para $\text{PM}_{2.5}$ o promedios horarios para O_3). El cálculo se debe realizar para cada prueba de campo como se presenta a continuación en la Ecuación 2.

$$\bar{x}_k = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \left[\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N x_{tj} \right]$$

Ecuación 2

donde:

\bar{x}_k es la medición promediada k del despliegue para una prueba de campo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$ o ppbv para O_3 , °C, %HR)

M es el número de instrumentos idénticos operando simultáneamente durante la prueba de campo

N es el número de periodos durante los cuales todos los equipos idénticos operan y producen promedios válidos a lo largo de la duración de la prueba de campo

x_{tj} es la medición válida promediada (ya sea diaria u horaria) para cada día u hora t y el equipo j ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$ o ppbv para O_3 , °C, %HR)

Precisión (Protocolo de prueba base)

La precisión entre SBC idénticos se determina calculando tanto la desviación estándar (SD, ver Ecuación 3) entre mediciones como el coeficiente de variación (CV, ver Ecuación 4). Los datos utilizados deben ser recolectados por SBC idénticos operando y recolectando mediciones de datos promediados válidos (ya sean promedios diarios para $\text{PM}_{2.5}$ o promedios horarios para O_3).

$$SD = \sqrt{\frac{1}{(N \times M) - 1} \sum_{j=1}^M \left[\sum_{t=1}^N (x_{tj} - \bar{x}_t)^2 \right]}$$

Ecuación 3

donde:

SD es la desviación estándar de las concentraciones de contaminante (ya sea de $PM_{2.5}$ u O_3) promediadas en el tiempo para el SBC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$ o ppbv para O_3)

M es el número de SBC idénticos operados simultáneamente durante la prueba de campo

N es el número de periodos de tiempo (ya sea de 24 horas o 1 hora) durante los cuales todos los equipos idénticos operan y recolectan promedios válidos durante la duración de la prueba de campo

x_{tj} es la concentración (de $PM_{2.5}$ u O_3) promediada en el tiempo (ya sea diaria u horaria) del SBC para ya sea el día o la hora t y el SBC j ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$ o ppbv para O_3)

\bar{x}_t es la concentración de contaminante (ya sea $PM_{2.5}$ u O_3) promedio (diario u horario) de los tres (3) SBC para el periodo de tiempo t ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$ o ppbv para O_3)

$$CV = \frac{SD}{\bar{x}} \times 100 \quad \text{Ecuación 4}$$

donde:

CV es el coeficiente de variación (%)

SD es la desviación estándar de las mediciones de las concentraciones promedio (ya sea diarias u horarias) de contaminante del SBC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$ o ppbv para O_3)

\bar{x} es la concentración promedio del contaminante (ya sea de $PM_{2.5}$ u O_3) en el despliegue del SBC para una prueba de campo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$ o ppbv para O_3)

Sesgo y Linealidad (Protocolo de prueba base)

Se recomienda usar un modelo de regresión lineal simple para cada SBC idéntico ($y = mx + b$) con las figuras gráficas correspondientes, teniendo precaución de utilizar las mediciones del contaminante del Instrumento de Grado de Regulatorio (ya sea de $PM_{2.5}$ u O_3) como la variable independiente (x) y las mediciones del contaminante del SBC (ya sea de $PM_{2.5}$ u O_3) como la variable dependiente (y). Calcule la pendiente (m), el intercepto (b) y el coeficiente de correlación (R^2). Los SBC que tienen modelos de regresión similares y valores altos de R^2 (cercano a 1) son típicamente más precisos que aquellos con modelos de regresión diferentes y valores bajos de R^2 , por lo que comparar las gráficas y estos criterios entre SBC idénticos puede ayudar a visualizar aún más la precisión del SBC.

Error (Protocolo de prueba base)

Un criterio que puede ser utilizado para determinar el error en las mediciones de concentración es la RMSE. Las mediciones del Instrumento de Grado Regulatorio se comparan con los datos durante los cuales todos los SBC reporten datos válidos promediados en el tiempo (ya sea diarios u horarios), asumiendo que solo un Instrumento de Grado Regulatorio estará operando. Cuando se utilizan varios Instrumentos de Grado Regulatorio, use reportes separados para cada uno.

Es importante aclarar que la RMSE se define de dos formas: describe la diferencia entre una medición y su valor real o describe la diferencia entre la medición y la línea de mejor ajuste de regresión lineal de una medición y su valor real correspondiente. La primera se utiliza en este documento (ver Ecuación 5), ya que la US EPA indica que se presume que es el mejor indicador del desempeño de un SBC recién desempacado y puede esperarse el error previo a cualquier corrección de los datos. Esta también es la forma en la que se calcula el error en la literatura a la fecha.

$$RSME = \sqrt{\frac{1}{N \times M} \sum_{j=1}^M \left[\sum_{t=1}^N (x_{tj} - R_t)^2 \right]}$$

Ecuación 5

donde:

RSME es la raíz del error cuadrático medio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$ o ppbv para O_3)

N es el número de periodos de tiempo válidos (ya sea 1 día o 1 hora) durante los cuales todos los equipos operan y recolectan promedios válidos durante la duración de la prueba de campo

M es el número de SBC idénticos operando simultáneamente durante la prueba de campo

x_{tj} es la concentración promediada en el tiempo (ya sea diaria u horaria) del contaminante (ya sea $\text{PM}_{2.5}$ u O_3) del SBC para el día u hora *t* y el equipo *j* ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$ o ppbv para O_3)

R_t es la concentración válida promediada en el tiempo (ya sea diaria u horaria) del contaminante (ya sea $\text{PM}_{2.5}$ u O_3) del Instrumento de Grado Regulatorio para el día u hora *t* ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$ o ppbv para O_3)

Adicionalmente, la raíz del error cuadrático medio normalizada (NRMSE, ver Ecuación 6) puede ser utilizada en condiciones ambiente donde las concentraciones son muy altas (v.g., incendios forestales para $\text{PM}_{2.5}$).

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\bar{R}_t} \times 100$$

Ecuación 6

donde:

NRMSE es la raíz del error cuadrático medio normalizada (%)

RMSE es la raíz del error cuadrático medio calculada en la Ecuación 5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

\bar{R}_t es el promedio diario de la concentración de $\text{PM}_{2.5}$ del Instrumento de Grado Regulatorio durante la totalidad del periodo de prueba ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Punto de Rocío y Efectos Meteorológicos (Protocolo de prueba base)

Tal como fue mencionado en secciones anteriores, la meteorología puede afectar la respuesta de un SBC, en particular la humedad relativa, la temperatura y el punto de rocío. Se recomienda desarrollar gráficos donde se puedan visualizar esos efectos en las concentraciones medidas, graficando las mediciones del SBC en el eje vertical como la variable dependiente y los parámetros meteorológicos (medidos con equipos de humedad relativa y temperatura, y no con sensores de temperatura y humedad relativa

integrados al SBC) como la variable independiente en el eje horizontal. Con el objetivo de desarrollar gráficos para analizar el efecto de la meteorología, a continuación se presentan las ecuaciones para obtener concentraciones normalizadas (i.e., la rata de concentración del SBC al Instrumento de Grado de Regulatorio), diferencia de concentración, diferencia de concentración absoluta y punto de rocío (todas estas ecuaciones asumen que solamente un Instrumento de Grado de Regulatorio está operando; cuando se usen varios Instrumento de Grado de Regulatorio, use reportes separados para cada uno).

Concentración Normalizada (Protocolo de prueba base)

Para obtener las concentraciones normalizadas diarias u horarias, divida las concentraciones del contaminante promediadas en el tiempo por las concentraciones del contaminante promediadas correspondientes del Instrumento de Grado Regulatorio como se muestra en la Ecuación 7.

$$NormC_{tj} = \frac{x_{tj}}{R_t} \quad \text{Ecuación 7}$$

donde:

$NormC_{tj}$ es la concentración promedio (ya sea diaria u horaria) normalizada de contaminante (ya sea $PM_{2.5}$ u O_3) del SBC para el día u hora t y el equipo j
 x_{tj} es la concentración promedio (ya sea diaria u horaria) válida de contaminante (ya sea $PM_{2.5}$ u O_3) del SBC para el día u hora t y el equipo j ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$ o ppbv para O_3)

R_t es la concentración promedio (ya sea diaria u horaria) válida de contaminante (ya sea $PM_{2.5}$ u O_3) del Instrumento de Grado Regulatorio para el día u hora t ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$ o ppbv para O_3)

Diferencia de Concentración (Protocolo de prueba base)

La diferencia de concentración se obtiene restando la concentración promediada en el tiempo de contaminante del Instrumento de Grado Regulatorio de la concentración promediada en el tiempo de contaminante del SBC, como se muestra en la Ecuación 8.

$$\Delta C_{tj} = x_{tj} - R_t \quad \text{Ecuación 8}$$

donde:

ΔC_{tj} es la -diferencia entre la concentración válida (ya sea $PM_{2.5}$ u O_3) promediada en el tiempo (ya sea diaria u horaria) del SBC y del Instrumento de Grado Regulatorio para el día u hora t y el SBC j ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$ o ppbv para O_3)

x_{tj} son los valores de la concentración válida (ya sea $PM_{2.5}$ u O_3) promediada en el tiempo (ya sea diaria u horaria) para el día u hora t y el SBC j ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$ o ppbv para O_3)

R_t es la concentración válida (ya sea $PM_{2.5}$ u O_3) promediada en el tiempo (ya sea diaria u horaria) del Instrumento de Grado Regulatorio para el día u hora t ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$ o ppbv para O_3)

Diferencia de Concentración Absoluta (Protocolo de prueba base)

La diferencia de concentración absoluta se obtiene tomando el valor absoluto de la diferencia entre la concentración promediada en el tiempo de contaminante del SBC y la concentración promediada en el tiempo de contaminante del Instrumento de Grado Regulatorio, como se muestra en la Ecuación 9.

$$Abs\Delta C_{tj} = |x_{tj} - R_t| \quad \text{Ecuación 9}$$

donde:

$Abs\Delta C_{tj}$ es la diferencia de valores de concentración absoluta entre la concentración de contaminante válida (ya sea $PM_{2.5}$ u O_3) y promediada en el tiempo (ya sea diaria u horaria) del SBC y el Instrumento de Grado Regulatorio para el día u hora t y el SBC j ($\mu g/m^3$ para $PM_{2.5}$ o ppbv para O_3)

x_{tj} es el valor de la concentración de contaminante válida (ya sea $PM_{2.5}$ u O_3) y promediada en el tiempo (ya sea diaria u horaria) para el día u hora t y el SBC j ($\mu g/m^3$ para $PM_{2.5}$ o ppbv para O_3)

R_t es el valor de la concentración de contaminante válida (ya sea $PM_{2.5}$ u O_3) y promediada en el tiempo (ya sea diaria u horaria) del Instrumento de Grado Regulatorio para el día u hora t ($\mu g/m^3$ para $PM_{2.5}$ o ppbv para O_3)

Punto de Rocío (Protocolo de prueba base)

El punto de rocío (DP) se obtiene de las mediciones de humedad relativa (HR y temperatura (T) (ver Ecuación 10). Como se mencionó anteriormente las mediciones de HR y T debe realizarse con equipos de humedad relativa y temperatura en paralelo con los SBC y los Instrumentos de Grado Regulatorio. No use mediciones de sensores de temperatura y humedad relativa integrados al SBC porque estas no representan con exactitud las condiciones ambiente de humedad relativa y temperatura.

$$DP_t = 243.04 \times \left[\frac{\ln\left(\frac{HR_t}{100}\right) + \frac{(17.625 \times T_t)}{(243.04 + T_t)}}{17.625 - \ln\left(\frac{HR_t}{100}\right) - \frac{(17.625 \times T_t)}{(243.04 + T_t)}} \right] \quad \text{Ecuación 10}$$

donde:

DP_t es el punto de rocío ambiente valido y promediado en el tiempo (ya sea diario u horario) para el día u hora t (°C)

HR_t es la humedad relativa ambiente válida y promediada en el tiempo (ya sea diaria u horaria) para el día u hora t (%)

T_t es la temperatura ambiente válida y promediada en el tiempo (ya sea diaria u horaria) para el día u hora t (°C)

Adicionalmente a continuación se presentan algunas sugerencias de gráficos que pueden ser útiles para visualizar los efectos de la meteorología en los SBC (US EPA 2021). Otras opciones pueden existir, pero esta lista se presenta dado que ningún gráfico específico ha demostrado ser útil para todos los tipos de SBC:

- ❖ Promedio normalizado de la concentración del contaminante del SBC vs. DP promedio

- ❖ Promedio normalizado de la concentración del contaminante del SBC vs. HR promedio
- ❖ Promedio normalizado de la concentración del contaminante del SBC vs. T promedio
- ❖ Promedio de la diferencia de concentración del contaminante entre el SBC y el Instrumento de Grado Regulatorio vs. DP promedio
- ❖ Promedio de la diferencia de concentración del contaminante entre el SBC y el Instrumento de Grado Regulatorio vs. HR promedio
- ❖ Promedio de la diferencia de concentración del contaminante entre el SBC y el Instrumento de Grado Regulatorio vs. T promedio
- ❖ Valor absoluto del promedio de la diferencia de concentración del contaminante entre el SBC y el Instrumento de Grado Regulatorio vs. DP promedio
- ❖ Valor absoluto del promedio de la diferencia de concentración del contaminante entre el SBC y el Instrumento de Grado Regulatorio vs. HR promedio
- ❖ Valor absoluto del promedio de la diferencia de concentración del contaminante entre el SBC y el Instrumento de Grado Regulatorio vs. T promedio

Si también se obtienen datos de interferentes de O_3 , algunos gráficos de dispersión opcionales se presentan a continuación:

- ❖ Concentración promedio horaria normalizada de O_3 del SBC vs. promedio horario de CO
- ❖ Concentración promedio horaria normalizada de O_3 del SBC vs. promedio horario de NO_2
- ❖ Concentración promedio horaria normalizada de O_3 del SBC vs. promedio horario SO_2
- ❖ Valor absoluto del promedio de la diferencia de concentración del contaminante entre el SBC y el Instrumento de Grado Regulatorio vs. promedio horario de CO
- ❖ Valor absoluto del promedio de la diferencia de concentración del contaminante entre el SBC y el Instrumento de Grado Regulatorio vs. promedio horario de NO_2
- ❖ Valor absoluto del promedio de la diferencia de concentración del contaminante entre el SBC y el Instrumento de Grado Regulatorio vs. promedio horario de SO_2
- ❖ Promedio de la diferencia de concentración de O_3 entre el SBC y el Instrumento de Grado Regulatorio vs. promedio horario de CO
- ❖ Promedio de la diferencia de concentración de O_3 entre el SBC y el Instrumento de Grado Regulatorio vs. promedio horario de NO_2
- ❖ Promedio de la diferencia de concentración de O_3 entre el SBC y el Instrumento de Grado Regulatorio vs. promedio horario de SO_2
- ❖ Promedio horario de la concentración de O_3 del Instrumento de Grado Regulatorio vs. promedio horario de NO_2
- ❖ Promedio horario de la concentración de O_3 del Instrumento de Grado Regulatorio vs. promedio horario de SO_2
- ❖ Promedio horario de la concentración de O_3 del Instrumento de Grado Regulatorio vs. promedio horario de CO

Cálculos para el Protocolo de la Prueba Mejorada

Las ecuaciones para calcular las características de desempeño para el protocolo de prueba mejorada se presentan a continuación.

Promedios de Datos (Protocolo de prueba mejorada)

El intervalo de tiempo seleccionado para promediar todos los datos será el del equipo con la menor resolución de tiempo (v.g., cuando se deba escoger entre una resolución de 1 minuto de un SBC, y sensores de HR y T y una resolución de 10 minutos del Instrumento de Grado Regulatorio, promedie todos los datos con la resolución de tiempo de 10 minutos).

Para PM_{2.5} la prueba mejorada permite datos con una mayor resolución horaria que la prueba base, dado que es difícil mantener una entrega estable de partículas por largos periodos de tiempo (promedios horarios, de 10 minutos y de 1 minuto). La resolución de tiempo seleccionada se define como t en la Ecuación 11. Los datos promediados requieren una integridad de datos del 75%, al igual que para la prueba base.

$$x_{ktj} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_{ij} \quad \text{Ecuación 11}$$

donde:

x_{ktj} es la medición promediada k para el intervalo de tiempo t y el equipo j ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{2.5} o ppbv, ppmv para O₃, °C, %HR)
 n es el número de mediciones del equipo durante el intervalo de tiempo t
 c_{ij} es la medición del equipo j para el tiempo i en el intervalo de tiempo t ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{2.5} o ppbv, ppmv para O₃, °C, %HR)

Promedios de Prueba (Protocolo de prueba mejorada)

Los datos promedio válidos para calcular los promedios de prueba de las mediciones para la Ecuación 12 deben ser recolectados durante el periodo de estado estable para cada prueba.

$$\bar{x}_k = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \left[\frac{1}{N} \sum_{h=1}^N x_{ktj} \right] \quad \text{Ecuación 12}$$

donde:

\bar{x}_k es la medición promediada de la prueba k para la prueba de la cámara ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{2.5} o ppbv, ppmv para O₃, °C, %HR)
 M es el número de instrumentos idénticos operando simultáneamente durante la prueba en la cámara
 N es el número de periodos válidos durante los cuales todos los equipos idénticos operan y producen promedios válidos a lo largo de la duración de la prueba en la cámara
 x_{ktj} es la medición valida promediada para el intervalo de tiempo t y el equipo j ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{2.5} o ppbv, ppmv para O₃, °C, %HR)

Precisión (Protocolo de prueba mejorada)

La precisión entre SBC idénticos se determina calculando tanto la desviación estándar (SD, ver Ecuación 13) entre mediciones como el coeficiente de variación (CV, ver Ecuación 14). Los datos utilizados deben

ser datos promedio válidos recolectados durante la prueba bajo condiciones de concentración media durante la prueba de deriva en periodo posterior al envejecimiento (Día 60) (ver Deriva: pg. 27).

$$SD = \sqrt{\frac{1}{(N \times M) - 1} \sum_{j=1}^M \left[\sum_{t=1}^N (x_{tj} - \bar{x}_t)^2 \right]} \quad \text{Ecuación 13}$$

donde:

SD es la desviación estándar de las mediciones de concentración de contaminante (ya sea de $PM_{2.5}$ u O_3) promediadas en el tiempo para la prueba del SBC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$ o ppbv para O_3)

M es el número de SBC idénticos operados simultáneamente durante la prueba de en la cámara

N es el número de periodos de tiempo válidos durante los cuales todos los equipos idénticos operan y recolectan promedios válidos durante la duración de la prueba en la cámara

x_{tj} es la concentración de contaminante del SBC (ya sea $PM_{2.5}$ u O_3) promediada en el intervalo de tiempo t y del SBC j ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$ o ppbv para O_3)

\bar{x}_t es la concentración (de $PM_{2.5}$ u O_3) promediada en el tiempo del SBC el intervalo de tiempo t ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$ o ppbv para O_3)

$$CV_{Mejorada} = \frac{SD}{\bar{x}} \times 100 \quad \text{Ecuación 14}$$

donde:

$CV_{Mejorada}$ es el coeficiente de variación (%)

SD es la desviación estándar de las mediciones de concentración de contaminante (ya sea de $PM_{2.5}$ u O_3) promediadas en el tiempo para la prueba del SBC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$ o ppbv para O_3)

\bar{x} es la concentración promedio del contaminante (ya sea de $PM_{2.5}$ u O_3) para la prueba en el despliegue del SBC para la prueba en la cámara ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$ o ppbv para O_3)

Sesgo y Linealidad (Protocolo de prueba mejorada)

Se recomienda usar un modelo de regresión lineal simple ($y = mx + b$) entre mediciones promediadas pares del SBC y del Instrumento de Grado Regulatorio. “Combinar los datos recolectados durante el periodo de estado estable de las condiciones de prueba de concentración baja y media durante la prueba de deriva del periodo posterior al envejecimiento (Día 60) y la prueba de concentraciones altas (ver Exactitud a Altas Concentraciones: pg 28), reflejará los datos recolectados durante condiciones similares de T y HR”³⁰. Tome las mediciones del contaminante del Instrumento de Grado de Regulatorio (ya sea de $PM_{2.5}$ u O_3) como la variable independiente (x) y las mediciones del contaminante del SBC (ya

³⁰ US EPA, 2021.

sea de $PM_{2.5}$ u O_3) como la variable dependiente (y). Calcule la pendiente (m), el intercepto (b) y el coeficiente de correlación (R^2).

Error (Protocolo de prueba mejorada)

Un criterio que puede ser utilizado para determinar el error en las mediciones de concentración es la RMSE. Calcúlela usando los datos válidos promedio recolectados durante las condiciones de prueba de concentración media del periodo posterior al envejecimiento (Día 60) de la prueba de deriva (ver Deriva: pg. 27). Compare los cálculos de las mediciones del SBC y del Instrumento de Grado de Regulatorio como se muestra en la Ecuación 15. Esto asume que solo un Instrumento de Grado Regulatorio estará operando. Cuando se utilizan varios Instrumentos de Grado Regulatorio, use reportes separados para cada uno. Es importante aclarar que la RMSE se define de dos formas: describe la diferencia entre una medición y su valor real o describe la diferencia entre la medición y la línea de mejor ajuste de regresión lineal de una medición y su valor real correspondiente. La primera se utiliza en este documento (ver Ecuación 15), ya que la US EPA indica que se presume que es el mejor indicador del desempeño de un SBC recién desempacado y puede esperarse el error previo a cualquier corrección de los datos. Esta también es la forma en la que se calcula el error en la literatura a la fecha.

$$RSME = \sqrt{\frac{1}{N \times M} \sum_{j=1}^M \left[\sum_{t=1}^N (x_{tj} - R_t)^2 \right]} \quad \text{Ecuación 15}$$

donde:

$RSME$ es la raíz del error cuadrático medio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$ o ppbv para O_3)

N es el número de periodos de tiempo válidos durante los cuales todos los equipos idénticos operan y recolectan promedios válidos durante la duración de la prueba en la cámara

M es el número de SBC idénticos operando simultáneamente durante la prueba en la cámara

x_{tj} es la concentración promediada en el tiempo del contaminante (ya sea $PM_{2.5}$ u O_3) del SBC en el intervalo de tiempo t para el equipo j ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$ o ppbv para O_3)

R_t es la concentración promedio del contaminante (ya sea $PM_{2.5}$ u O_3) del Instrumento de Grado Regulatorio para el tiempo t ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$ o ppbv para O_3)

Adicionalmente, la raíz del error cuadrático medio normalizada (NRMSE, ver Ecuación 16) puede ser utilizada en condiciones ambiente donde las concentraciones son muy altas (v.g., incendios forestales para $PM_{2.5}$).

$$NRMSE = \frac{RMSE}{R_t} \times 100 \quad \text{Ecuación 16}$$

donde:

$NRMSE$ es la raíz del error cuadrático medio normalizada (%)

$RMSE$ es la raíz del error cuadrático medio calculada en la Ecuación 15 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

\bar{R}_t es la concentración válida promedio de $\text{PM}_{2.5}$ de la prueba del Instrumento de Grado Regulatorio durante el periodo de prueba ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Efecto de Interferentes (Protocolo de prueba mejorada)

El efecto de cada interferente para la prueba mejorada de O_3 es la diferencia entre la medición tomada durante estado estable a una concentración definida de O_3 y la de estado estable cuando la concentración definida de O_3 y la concentración definida de interferente están presentes (ver Ecuación 17).

$$\bar{x}_{int} = \overline{x_{(O_3 + int)}} - \bar{x}_{O_3} \quad \text{Ecuación 17}$$

donde:

\bar{x}_{int} es la influencia del interferente promedio de la prueba en un SBC (ppmv o ppbv, dependiendo del interferente)

$\overline{x_{(O_3 + int)}}$ es la concentración promedio de O_3 de la prueba para la porción de la prueba en la cámara donde el O_3 y el interferente están ambos presentes (ppmv o ppbv, dependiendo del interferente)

\bar{x}_{O_3} es la concentración promedio de O_3 de la prueba para la porción de la prueba en la cámara donde solamente el O_3 está presente (ppmv o ppbv, dependiendo del interferente)

Efecto de la Humedad Relativa (Protocolo de prueba mejorada)

El efecto de la HR es la diferencia entre los datos recolectados durante estado estable a una concentración de contaminante definida, bajo una humedad relativa de 40% y los datos recolectados durante estado estable a la misma concentración de contaminante definida, bajo una humedad relativa de 85% (ver Ecuación 18).

$$\bar{x}_{HR} = \overline{x_{(HR=85\%)}} - \overline{x_{(HR=40\%)}} \quad \text{Ecuación 18}$$

donde:

\bar{x}_{HR} es la influencia promedio de la prueba de la HR sobre las mediciones del SBC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$ o ppbv para O_3)

$\overline{x_{(HR=85\%)}}$ es la concentración promedio de contaminante (ya sea $\text{PM}_{2.5}$ u O_3) de la prueba del SBC, para la porción de la prueba en la cámara donde la HR es 85% ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$ o ppbv para O_3)

$\overline{x_{(HR=40\%)}}$ es la concentración promedio de contaminante (ya sea $\text{PM}_{2.5}$ u O_3) de la prueba del SBC, para la porción de la prueba en la cámara donde la HR es 40% ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$ o ppbv para O_3)

Efecto de la Temperatura (Protocolo de prueba mejorada)

El efecto de la temperatura es la diferencia entre los datos recolectados durante estado estable a una concentración de contaminante definida a 20°C y los datos recolectados durante estado estable a la misma concentración de contaminante definida a 40°C (ver Ecuación 19).

$$\overline{x_T} = \overline{x_{(T=40)}} - \overline{x_{(T=20)}} \quad \text{Ecuación 19}$$

donde:

$\overline{x_T}$ es la influencia promedio de la prueba de la T sobre las mediciones del SBC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$ o ppbv para O_3)

$\overline{x_{(T=40)}}$ es la concentración promedio de contaminante (ya sea $\text{PM}_{2.5}$ u O_3) de la prueba del SBC, para la porción de la prueba en la cámara donde la T es 40°C ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$ o ppbv para O_3)

$\overline{x_{(T=20)}}$ es la concentración promedio de contaminante (ya sea $\text{PM}_{2.5}$ u O_3) de la prueba del SBC, para la porción de la prueba en la cámara donde la T es 20°C ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$ o ppbv para O_3)

Deriva (Protocolo de prueba mejorada)

La deriva se calcula como la diferencia en las mediciones para el periodo de 60 días, para tanto la concentración baja y media de contaminante (ver Ecuación 20).

$$\overline{x_{C_{deriva}}} = \overline{x_{C(día=60)}} - \overline{x_{C(día=1)}} \quad \text{Ecuación 20}$$

donde:

$\overline{x_{C_{deriva}}}$ es la deriva promedio de la prueba para el SBC a una concentración C (ya sea 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ o 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$ o 15 ppbv o 70 ppbv para O_3) del contaminante (ya sea $\text{PM}_{2.5}$ u O_3) en el transcurso de 60 días ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$ o ppbv para O_3)

$x_{C(día=60)}$ es la concentración de promedio de contaminante (ya sea $\text{PM}_{2.5}$ u O_3) de la prueba para el SBC a una concentración C (ya sea 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ o 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$ o 15 ppbv o 70 ppbv para O_3) después de 60 días de operación desde el inicio de la prueba de deriva ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$ o ppbv para O_3)

$x_{C(día=1)}$ es la concentración de promedio de contaminante (ya sea $\text{PM}_{2.5}$ u O_3) de la prueba para el SBC a una concentración C (ya sea 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ o 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$ o 15 ppbv o 70 ppbv para O_3) al inicio de la prueba de deriva ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$ o ppbv para O_3)

Exactitud a Concentraciones Altas (Protocolo de prueba mejorada)

La exactitud a concentraciones altas se calcula como la diferencia entre las mediciones del SBC y el Instrumento de Grado de Referencia durante la prueba a altas concentraciones (ver Ecuación 21).

$$\overline{x_{\Delta}} = \overline{x_{SBC}} - \overline{x_{ref}} \quad \text{Ecuación 21}$$

donde:

$\overline{x_{\Delta}}$ es la diferencia promedio entre las concentraciones del contaminante (ya sea $PM_{2.5}$ u O_3) del SBC y el Instrumento de Grado Regulatorio para la prueba ($\mu g/m^3$ para $PM_{2.5}$ o ppbv para O_3)

$\overline{x_{SBC}}$ es la concentración promedio de contaminante (ya sea $PM_{2.5}$ u O_3) del SBC para la prueba ($\mu g/m^3$ for $PM_{2.5}$ or ppbv for O_3)

$\overline{x_{ref}}$ es la concentración promedio de contaminante (ya sea $PM_{2.5}$ u O_3) del Instrumento de Grado Regulatorio para la prueba ($\mu g/m^3$ para $PM_{2.5}$ o ppbv para O_3)

Criterios de Aceptabilidad para SBC

Después de llevar a cabo los protocolos de prueba y de calcular las características de desempeño recomendadas, la calidad de los datos de los SBC y su desempeño pueden ser evaluados mediante la comparación de las características de desempeño con los valores objetivo recomendados (i.e., Criterios de Aceptabilidad), los cuales han sido desarrollados por la US EPA con base en rangos alcanzables observados de acuerdo al estado de la ciencia para el desempeño de SBC. Los valores objetivo recomendados han sido definidos para los resultados del protocolo de prueba de base. No se han definido valores objetivo para los resultados del protocolo de prueba mejorada “debido a factibilidad limitada, falta de acuerdo en cuanto a los protocolos de prueba, inconsistencias en los resultados de evaluación de SBC que pueden resultar por la cantidad limitada de datos que se recolectan y a la variación de la opción del sustituto de PM^{31} . Los valores objetivo recomendados se presentan en la Tabla 11.

Tabla 11. Valores Objetivo Recomendados (Criterios de Aceptabilidad) de $PM_{2.5}$ y O_3 de SBC para la Prueba Base (para uso en aplicaciones NSIM)

Característica de Desempeño	Criterio	Valor Objetivo de $PM_{2.5}$	Valor Objetivo de O_3
Precisión	Desviación Estándar (SD)	$\leq 5 \mu g/m^3$	≤ 5 ppbv
	σ		
	Coeficiente de Variación (CV)	$\leq 30\%$	$\leq 30\%$
Sesgo	Pendiente	1.0 ± 0.35	1.0 ± 0.2
	Intercepto (b)	$-5 \leq b \leq 5 \mu g/m^3$	$-5 \leq b \leq 5$ ppbv
Linealidad	Coeficiente de Correlación $-(R^2)$	≥ 0.70	≥ 0.80
Error	Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE)	$RMSE \leq 7 \mu g/m^3$	≤ 5 ppbv
	σ	σ	
	Raíz del Error Cuadrático Medio normalizada (NRMSE)	$NRMSE \leq 30\%$	-

Adaptado (US EPA, 2021).

³¹ US EPA, 2021.

Adicionalmente los usuarios de SBC podrían considerar los objetivos de la recolección de sus datos (i.e., su área de aplicación de acuerdo a lo descrito en la Tabla 12), lo que puede guiarlos para establecer metas de desempeño en términos de la integridad de los datos y del error en la precisión y el sesgo. Entre más riguroso sea el objetivo del proyecto, se espera que las metas de desempeño también requieran datos de mayor calidad y mejor desempeño del SBC utilizado. La Tabla 12 contiene cuatro áreas de aplicación y sus valores objetivo recomendados e incluye valores para el monitoreo regulatorio para esas metas de desempeño con fines comparativos.

Tabla 12. Valores Objetivo Adicionales Recomendados para la Integridad de los Datos y el Error de la Precisión y el Sesgo

Área de Aplicación	Descripción del Área de Aplicación y Base Lógica para los Valores Objetivo	Contaminantes	Precisión y Error del Sesgo	Integridad de los Datos
Educación e Información	Los SBC se usan como herramienta de aprendizaje. Los datos se utilizan para concientizar sobre los desafíos de la calidad del aire. El error de las mediciones no es tan importante como simplemente demostrar que el contaminante existe en un rango de concentración amplio.	Todos	< 50%	≥ 50%
Identificación de Puntos Críticos y Caracterización	Los SBC son utilizados para elaborar un mapa de contaminantes y determinar fuentes de emisión. Acá se requieren datos de mayor calidad para asegurar no sólo que el contaminante de interés existe en la atmósfera local, sino también a una concentración cercana a su valor real.	Todos	< 30%	≥ 75%
Monitoreo Suplementario	El monitoreo suplementario puede tener valor potencialmente en proveer datos adicionales de calidad de aire para complementar Instrumentos de Grado Regulatorio existentes. Para ser útil para proveer esos datos complementarios, estos deben ser de una calidad suficiente para asegurar que la información adicional ayude a cerrar brechas de información de monitoreo en vez de hacer que la situación se entienda menos.	Contaminantes Criterio, Toxinas del Aire (incluyendo COVs)	< 20%	≥ 80%
Exposición Personal	Los SBC se utilizan para hacer el monitoreo de la exposición de personas a contaminación del aire. Muchos factores pueden influenciar la exposición personal a contaminación del aire. Los errores en la precisión y el sesgo sugeridos acá son representativos de aquellos utilizados en la literatura científica bajo una variedad de circunstancias. Valores de error mayores dificultan entender cómo, cuándo y por qué ocurrió la exposición personal.	Todos	< 30%	≥ 80%

Monitoreo Regulatorio	Proceso mediante el cual el gobierno y/o agencias regulatorias de la calidad del aire determinan si un área está cumpliendo con los estándares de calidad de aire. Se requieren mediciones precisas para asegurar que se están obteniendo datos de alta calidad para cumplir con los requerimientos regulatorios.	O ₃	< 7%	≥ 75%
		CO, SO ₂	< 10%	
		NO ₂	< 15%	
		PM _{2.5} , PM ₁₀	< 10%	

Adaptado (US EPA, 2014).

Compilación de SBC

Esta sección presenta una compilación de información de las características de desempeño de SBC y otros parámetros que pueden ser útiles para los usuarios. Se incluyen las referencias de los datos presentados para que el lector pueda mirar en detalle estas consideraciones cuando analice esta información. También se incluye una lista³² de reportes que contienen información útil para analizar diferentes características de los SBC. Es importante resaltar que en este documento se trabajó con la información disponible de algunas marcas con data libre en la web que, a manera de ejemplo, pretende presentar el prototipo de datos característicos para estos instrumentos de medición. Sin embargo, no pretende cubrir todo el portafolio de productos disponibles en el mercado y se le recomienda a las autoridades o personas interesadas en el uso de estos elementos, hacer su propio análisis de los modelos que mejor se adapten a sus necesidades y condiciones específicas, tales como la configuración del experimento, el lugar y la duración de la calibración, entre otros.

- AIRLAB Microsensor Challenge 2021 edition
(<https://airlab.solutions/en/projets/challenge-microcapteurs-edition-2021-90>)
- European Commission, Review of sensors for air quality monitoring
(<https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC116534>)
- European Commission, Review of performance of Low-cost sensors for Air Quality Monitoring
(<https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC117372>)
- European Commission, Evaluation of low-cost sensors for air pollution monitoring: effect of gaseous interfering compounds and meteorological conditions
(<https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/23e1a2c7-3c41-11e7-a08e-01aa75ed71a1/language-en>)
- South Coast AQMD, Air Sensor Performance Evaluation Center
(<https://www.aqmd.gov/aq-spec>)
- US EPA, 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
(https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_Report.cfm?dirEntryId=350785&Lab=CEMM)
- US EPA, Performance Testing Protocols, Metrics, and Target Values for Ozone Air Sensors. Use in Ambient, Outdoor, Fixed Site, Non-Regulatory Supplemental and Informational Monitoring Applications
(https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_Report.cfm?dirEntryId=350784&Lab=CEMM)
- US EPA, Air sensor toolbox
(<https://www.epa.gov/air-sensor-toolbox>)
- US EPA, Evaluation of emerging air sensor performance
(<https://www.epa.gov/air-sensor-toolbox/evaluation-emerging-air-sensor-performance>)
- US EPA, Sensor Evaluation Report
(https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?Lab=NERL&dirEntryId=277270&simpleSearch=1&searchAll=sensor+evaluation+report)
- US EPA, Evaluation of Field-deployed Low Cost PM Sensors
(https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?Lab=NERL&dirEntryId=297517)

³² Retama, A., 2022.

Tabla 13. Información Compilada de SBC de PM_{2.5}.

Fabricante	Modelo	Principio	Medición y Rango de Detección	Resolución Temporal	Rango de T y HR	R ²	RMSE (µg/m ³)	Precisión (CV, %)
Alphasense Ltd.	OPC-N2	L.S.S.	0.38–17 µm, 16 canales (concentración en número) PM ₁ , PM _{2.5} , PM ₁₀	1.4 s	-10–50 °C 0–95% (n.c.)	0.007** (PM _{2.5}) 0.01** (PM ₁₀)		
	OPC-N3	L.S.S.	0–2000 µg/m ³ 0.35–40 µm, 24 canales (concentración en número) PM ₁ , PM _{2.5} , PM ₁₀ , T y HR	1 s	-10–50 °C 0–95% (n.c.)	0.75- 0.81 ⁺		
	OPC-R1	L.S.S.	0.35–12.4 µm 16 canales (concentración en número), PM ₁ , PM _{2.5} , PM ₁₀ , T y HR	1 s	-10–50 °C 0–95% (n.c.)			
Dylos Corp	DC1700 PM PM _{2.5} /PM ₁₀ AQM	L.S.S.	0–10 ⁶ Partícula/cm ³ >0.5 y >2.5 µm y PM _{2.5} y PM ₁₀ en µg/m ³	60 s	n.a.			
	DC1100*		Conteo de partículas*	60 s	- 95%	0.548*		
Honeywell	HPMA115SO-XXX	L.S.S.	0–1000 µg/m ³ PM _{2.5} en µg/m ³ (PM ₁₀ en µg/m ³ con programación adicional)	n.a.	-10–50 °C 0–95% (n.c.)			
Met One	831 Aerosol Mass Monitor	Fotómetro	0–1.000 µg/m ³ >0.1 µm	60 s	0–50 °C 90%*	0.773*		
Nova Fitness	SDS011	L.S.S.	0–999.9 µg/m ³ 0.3–10 µm	1 s	-20–60 °C <70%			
		L.S.S.	0–999.9 µg/m ³ 0.3–10 µm	1 s	-20–60 °C <70%			
		L.S.S.	0–20 mg/m ³ 1–100 µm	1 s	-20–60 °C <70%			
Plantower	PMSA003	L.S.S.	0–500 µg/m ³ 0.3–1.0; 1.0–2.5; 2.5–10 µm en tres canales	n.a.	n.a.			
	PMS 3003	L.S.S.	0.3–1.0; 1.0–2.5; 2.5–10 µm en tres canales	n.a.	-10–60 °C 0–99%			
	PMS 5003	L.S.S.	n.a.	n.a.	n.a.			
	PMS 7003	L.S.S.	n.a.	n.a.	n.a.			

Fabricante	Modelo	Principio	Medición y Rango de Detección	Resolución Temporal	Rango de T y HR	R ²	RMSE (µg/m ³)	Precisión (CV, %)
Samyoung	PSML(LPO)	Fotómetro	0–900 µg/m ³ PM _{2.5} y PM ₁	1 s	-10–65 °C <95% (n.c.)			
Sharp	GP2Y1010AU0F	Fotómetro	n.a.	n.a.	-10–60 °C 10–90%			
	DN7C3CA006	Fotómetro	25–500 µg/m ³	n.a.	-10–60 °C 10–90%			
Shinyei	PPD42NJ	Fotómetro	>1 µm	n.a.	0–45 °C <95% (n.c.)			
	PPD60PV-T2	Fotómetro	>0.5 µm	n.a.	0–45 °C <95% (n.c.)			
	PPD20V	Fotómetro	>1 µm	n.a.	0–40 °C <95% (n.c.)			
	PPD71	Fotómetro	>0.5 µm	n.a.	-10–60 °C <95% (n.c.)			
	PMS-SYS-1			1 s	- 95%*	0.152*		
Winsen	ZH03B	Fotómetro	0–1000 µg/m ³	n.a.	-10–50 °C 0–85% (n.c.)			
AirBase	CanarIT*			20 s*	- 100%*	0.004*		
CairClip PM				60 s*	- 95%*	0.064*		
Carnegie Mellon Speck			Conteo de partículas*	1 s*	- 90%*	0*		
RTI	MicroPEM		Conteo de partículas*	10 s*	- 95%*	0.720*		
Purple Air	PA-II-SD		2-36 µg/m ³			0.81 ⁺	6.52 ⁺	0.89 ⁺
Sensit	RAMP		0-4 µg/m ³			0.91 ⁺	7.07 ⁺	8.67 ⁺
Vaisala	AQT420		1-5 µg/m ³			0.01 ⁺	6.98 ⁺	31.03 ⁺
Clarity	Node					0.84 ⁺	3.59 ⁺	13.32 ⁺
	Node S					0.77 ⁺	7.64 ⁺	4.62 ⁺

Adapted (Venkatraman Jagatha, J. et. al., 2021).

*US EPA, 2014.

** Williams, R., et. al., 2017. Performance Evaluation of the United Nations Environment Programme Air Quality Monitoring Unit. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-17/171, 2017.

⁺ US EPA, 2021.

Referencias

C. Hoyos, Personal communication (AMVA Citizen Scientists: Experience of Monitoring Air Quality using Low Cost Sensors), May 3, 2022.

Commission for Environmental Cooperation (CEC). Feasibility Study: Expanding the use of volunteer observer networks and citizen science tools in North America to address gaps in precipitation and wildfire monitoring: Report 1. Networks Review. Montreal, 2020.

deSouza, P., Kahn, R., Stockman, T., Obermann, W., Crawford, B., Wang, A., Crooks, J., Li, J., and Kinney, P. Calibrating Networks of Low-Cost Air Quality Sensors. *Atmos. Meas. Tech. Discuss.* [preprint], <https://doi.org/10.5194/amt-2022-65>, in review, 2022.

Holder, A., Clements, A., and Barkjohn, K. (2022, February 16). *How to evaluate air sensors for smoke monitoring applications*. EPA Tools and Resources Webinar. US EPA Office of Research and Development, Online. 2022. <https://www.youtube.com/watch?v=wnSioJem6jY>

Liang, L. 2021. Calibrating low-cost sensors for ambient air monitoring: Techniques, trends, and challenges. *Environmental Research*. Volume 197. ISSN 0013-9351. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111163>.

Raheja, G., Sabi, K., Sonla, H., Kokou Gbedjangni, E., McFarlane, C., Gameli Hodoli, C., and Westervelt, D.M. A Network of Field-Calibrated Low-Cost Sensor Measurements of PM_{2.5} in Lomé, Togo, Over One to Two Years. *ACS Earth and Space Chemistry* 6 (4), 1011-1021. DOI: 10.1021/acsearthspacechem.1c00391

Retama, A. (2022, August 29th – September 1st). *Ensamblajes, calibración, cuidados y manejo de datos. Consideraciones de precisión y confiabilidad, incluyendo criterios de aceptabilidad para su uso [presentation]*. Capacitación Técnica: Fortalecimiento de capacidades en el entendimiento del uso, funcionamiento y generación de información de calidad de aire con sensores de bajo costo en el marco de la colaboración PNUMA - Clean Air Institute, Online. 2022.

Tracking California, Comité Cívico del Valle, and University of Washington. Guidebook for Developing a Community Air Monitoring Network: Steps, Lessons, and Recommendations from the Imperial County Community Air Monitoring Project. Richmond, CA., 2018.

United States Environmental Protection Agency (US EPA). Air Sensor Guidebook. Washington, D.C., 2014.

United States Environmental Protection Agency (US EPA). Performance Testing Protocols, Metrics, and Target Values for Ozone Air Sensors. Use in Ambient, Outdoor, Fixed Site, Non-Regulatory Supplemental and Informational Monitoring Applications. Washington, D.C., 2021.

United States Environmental Protection Agency (US EPA). 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. Washington, D.C., 2021.

Venkatraman Jagatha, J.; Klausnitzer, A.; Chacón-Mateos, M.; Laquai, B.; Nieuwkoop, E.; van der Mark, P.; Vogt, U.; Schneider, C. Calibration Method for Particulate Matter Low-Cost Sensors Used in Ambient Air Quality Monitoring and Research. *Sensors* 2021, 21, 3960. <https://doi.org/10.3390/s21123960>

Williams, R., T. Conner, A. Clements, V. Foltescu, V. Nthusi, J. Jabbour, D. Nash, J. Rice, A. Kaufman, A. Rourk, and M. Srivastava. Performance Evaluation of the United Nations Environment Programme Air Quality Monitoring Unit. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-17/171, 2017.

World Meteorological Organization (WMO). An update on low-cost sensors for the measurement of atmospheric composition. Geneva, 2021.