



# Seminario web de herramientas y recursos de la EPA – FRM/FEM y sensores: Estrategias complementarias para determinar la calidad del aire ambiental

**Andrea Clements y Robert Vanderpool**

*Centro para Mediciones y Modelos Ambientales*

*Oficina de Investigación y Desarrollo de la EPA de los EE. UU.*

**18 de diciembre de 2019**

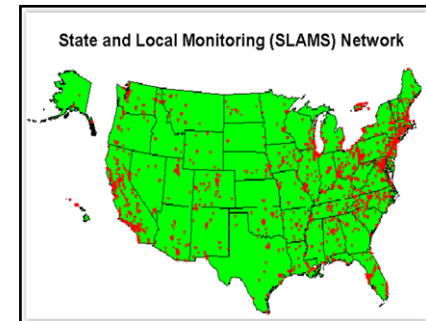


# Esquema de la presentación

- Propósito y requisitos reglamentarios para el monitoreo del aire ambiental
- Métodos de Referencia Federales (FRM)
- Métodos Equivalentes Federales (FEM)
- Especificaciones de rendimiento para el monitoreo reglamentario de contaminantes regulados
- Efectos nacionales e internacionales de los métodos exactos para el monitoreo del aire
- Identificación de la necesidad de sensores de aire
- Diferencias clave entre los FRM/FEM y los sensores de aire
- Definición de sensores de aire
- Diseño de sensores de aire disponibles en el comercio
- Características de rendimiento de los sensores de aire
- Criterios de selección de monitores reglamentarios frente a monitores de aire a base de sensores

# Antecedentes

- Se han reconocido por mucho tiempo los efectos adversos para la salud de la exposición a contaminantes en el aire.
- La Organización Mundial de la Salud (OMS) estima que ocurren aproximadamente 4 millones de muertes cada año en el mundo debido a la exposición a la contaminación del aire ambiental.
- La Ley de Aire Limpio (CAA) de los EE. UU. exige el monitoreo en todo el país de seis “contaminantes regulados” (CO, O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, Pb y material particulado) que se conoce que representan amenazas a la salud pública.
- La red de monitoreo de contaminantes en todo el país de la EPA representa una importante herramienta para:
  - Evaluar la exposición del público a los contaminantes regulados.
  - Evaluar la efectividad de las estrategias de control de contaminantes



# Monitores reglamentarios

- La CAA especifica lo siguiente:
  - Configuración y operación continua de estaciones de monitoreo del aire en todo el país
  - Deben designarse los monitores formalmente como Métodos de Referencia Federales (FRM) o Métodos Equivalentes Federales (FEM)
- Ambos tipos, FRM y FEM, tienen criterios muy estrictos de medición para asegurar que los datos respalden decisiones de gestión de calidad del aire que sean exactas y efectivas.
- La ORD de la EPA (RTP, NC) tiene el mandato del Congreso de revisar nuevos diseños de instrumentos y designar formalmente los monitores aprobados como tipos FRM o FEM.
  - El anuncio formal de designaciones de nuevos instrumentos se lleva a cabo a través de avisos en el *Registro Federal*



## FRM

- Están diseñados para aportar la medición de concentración más fundamentalmente razonable y defendible científicamente
- Los principios de medición de FRM para cada contaminante regulado se publican en el Título 40 del Código de Reglamentaciones Federales (CFR), Parte 50
- Los FRM sirven a modo de base de comparación según la cual juzgar los métodos de medición



## FEM

- Están destinados a aportar un nivel comparable de calidad para la toma de decisiones de cumplimiento como lo hacen los FRM
- Pueden incluir tecnologías más nuevas, innovadoras para reducir el costo operativo general y lograr múltiples objetivos de monitoreo (por ej., informes en tiempo real para estudios de salud y para emitir advertencias oportunas de salud pública)



## Programa de designación de métodos FRM y FEM

- Efectúa activamente evaluaciones técnicas y administrativas de nuevos candidatos de FRM y FEM para su aprobación
- Examina solicitudes de modificación en cuanto a cambios propuestos en el hardware, software, firmware y/o procedimientos operativos de un analizador designado FRM o FEM
  - Las evaluaciones de solicitudes de modificación son necesarias para asegurar que se mantenga la respuesta exacta de medición del analizador
- Las evaluaciones incluyen el examen administrativo de los datos de rendimiento presentados por el fabricante
  - En algunos casos, se requiere la evaluación de laboratorio y/o local de campo de los instrumentos candidatos para poder tomar decisiones confiables de designación
- Durante los últimos 5 años, se tomaron 116 FRM/FEM decisiones de designación formalmente



# Programa de designación de métodos FRM/FEM

- **Métodos designados de referencia y equivalentes**

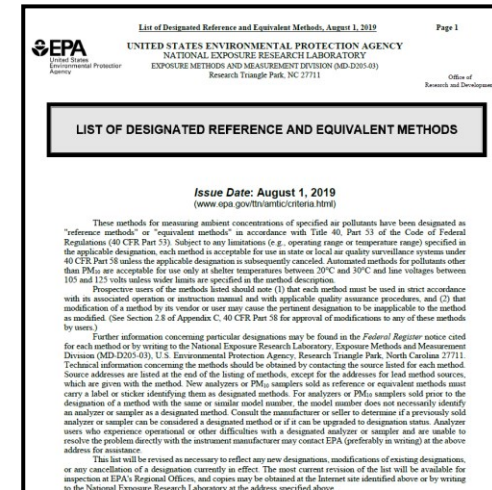
- Aquí se puede hallar la lista de FRM y FEM:

<https://www.epa.gov/amtic/air-monitoring-methods-criteria-pollutants> (en inglés)

- Se actualiza dos veces al año

- **Dificultad programática**

- La actividad de evaluación de solicitudes se encuentra a un nivel históricamente alto
- La ORD de la EPA no tiene control sobre el número, el tipo o la complejidad de las solicitudes recibidas en un momento dado
- Se requiere la gestión efectiva para asegurar que las evaluaciones se realicen dentro de los plazos que dicta el Congreso





# Especificaciones operativas críticas de FRM/FEM

- Exactitud
- Precisión
- Rango
- Límite de detección
- Especificidad del contaminante
- Libertad de interferencias de los co-contaminantes
- Ruido
- Distorsión (corto plazo y largo plazo)
- Retardo/Subida/Bajada (analizadores de gas)
- Rendimiento de medición en múltiples sitios

**La calidad de las decisiones de gestión basadas en la salud es *directamente proporcional a la calidad de los datos de medición del contaminante.***

**Cada especificación tiene estrictos requisitos de prueba y criterios de aceptación.  
Un instrumento candidato debe pasar TODAS estas pruebas a fin de ser aprobado por la EPA.**

**Los fabricantes pueden diseñar satisfactoriamente instrumentos FRM y FEM “totalmente nuevos” porque los requisitos de prueba de la EPA, sus procedimientos de prueba y criterios de aceptación se especifican explícitamente en las regulaciones.**



# Iniciativas generales de QA/QC

- Aseguramiento de la calidad/control de calidad (QA/QC) de fabricación de instrumentos (por ej., ISO 9001) para asegurar que se fabriquen los instrumentos según las especificaciones aprobadas
- Ubicación correcta de los FRM/FEM para cumplir con los requisitos reglamentarios
- Configuración, calibración, operación, mantenimiento y resolución de problemas competentes de los instrumentos
- Auditorías periódicas internas y externas de instrumentos-Programa de Evaluación de Rendimiento (PEP)
- Auditorías periódicas internas y externas de laboratorios analíticos
- Inspección y validación de datos antes de los informes de datos finales y el uso

**Además del proceso de designación formal FRM y FEM de instrumentos, hay múltiples iniciativas para asegurar que se generen datos de redes exactos para su uso destinado.**



# Impacto de los datos exactos sobre calidad del aire

- Determinar el cumplimiento con las regulaciones de calidad del aire
- Determinar tendencias nacionales y distribución de la contaminación del aire
- Evaluar la efectividad de las estrategias de control de contaminantes
- Proporcionar datos para desarrollar/evaluar modelos numéricos de calidad del aire
- Proporcionar datos de exposición para estudios de salud pública
- Permitir advertencias oportunas de salud pública
- Comentar evaluaciones y revisiones de los Estándares Nacionales de Calidad del Aire Ambiental (NAAQS)
- Evaluación de tecnologías alternativas (por ej., sensores)
- Retroalimentación para solicitudes de permisos
- Desarrollo de Planes de Implementación Estatal (SIP)

**El alcance y la magnitud de estos beneficios se ven influenciados directamente por la calidad de nuestras mediciones de contaminantes en todo el país.**

**Existen costos reales y dramáticos (tanto financieros como de salud) asociados con la toma de decisiones incorrectas basadas en datos de monitoreo que son de calidad inherentemente deficiente.**

# Impacto nacional e internacional

- Los métodos de monitoreo FRM/FEM aprobados por la ORD de la EPA son reconocidos nacional e internacionalmente como la regla de oro en cuanto a monitores de aire por parte de los programas reglamentarios de Gobierno, fabricantes de instrumentos, investigadores de calidad del aire, científicos de salud y el público.
- Alrededor del 80% de las ventas de instrumentos designados FRM/FEM se realizan ahora en el extranjero.
- La designación con el “sello de aprobación” de la EPA en los instrumentos de calidad del aire fabricados es una ventaja enorme de mercadeo para el fabricante del instrumento.
- En vista del despliegue y la operación mundial de los muestreadores y analizadores FRM/FEM de la EPA, los usuarios tienen la seguridad de que se obtienen datos de calidad exacta para realizar evaluaciones de salud pública científicamente defendibles y tomar decisiones efectivas de gestión de la calidad del aire.



# Rol de los sensores

- La meta de la red de monitoreo reglamentario en todo el país es evaluar la exposición del público a los contaminantes regulados y examinar la efectividad de las estrategias de control de contaminantes
- Muchos otros lugares y maneras en que la gente quiere hacer mediciones de calidad del aire
  - La **innovación** se necesita en la tecnología para hacer posibles estas mediciones



Sitio de monitoreo reglamentario



Más mediciones locales y sitios temporales



Exploración educativa



Mediciones móviles que llevan los individuos

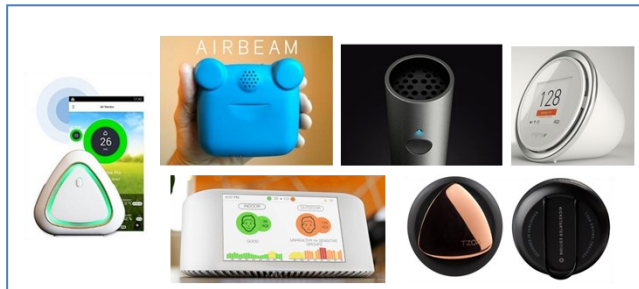


Mediciones móviles usando vehículos

# Diferencias clave

	Monitores de referencia	Sensores de bajo costo
<b>Costo típico de compra</b>	\$15,000 a \$40,000 (USD)	\$200 a \$5,000 (USD)
<b>Capacitación del personal</b>	Personal técnico altamente capacitado	Poco o nada de capacitación para operar. Pueden necesitar más capacitación para interpretar datos
<b>Gasto operativo</b>	Costoso – refugio, personal técnico, mantenimiento, reparación, aseguramiento de la calidad.	Puede ser menos costoso – reemplazo, streaming de datos, gestión de datos.
<b>Ubicación del sitio</b>	Ubicación fija. (se necesita remolque/inmueble con climatización)	Más portátil. Puede requerir protecciones contra la intemperie. Puede ser más fácil la ubicación debido a menores índices de flujo pero más complicado debido a streaming de datos.
<b>Calidad de datos</b>	Calidad conocida y constante en una variedad de condiciones.	Se desconoce. Puede variar de un sensor a otro, en diferentes condiciones meteorológicas, y en diferentes ambientes contaminados.
<b>Duración operativa</b>	10+ años (calibrado y operado para mantener exactitud).	Breve (1 año ) o se desconoce (puede tornarse menos sensible con el paso del tiempo).
<b>¿Monitoreo reglamentario?</b>	Sí	No

# Definición de sensores de aire



## Sensores OEM (equipo original)

- Sensor electroquímico o de tipo óptico “Raw”, óxido de metal
- Poco o nada de procesamiento de datos o interfaz en el sensor
- Relativamente pocos tipos diferentes de OEM para un contaminante dado

## Sensor/Sistema sensor/Dispositivo sensor/Nodo sensor (muchos nombres)

- Uno o más sensores OEM integrados en un dispositivo con gestión de datos/energía en algún tipo de alojamiento
- Puede ser muestreo pasivo o activo
- Los datos se reportan generalmente en tiempo real con alta resolución de tiempo
- Los integradores diseñan para diferentes necesidades/aplicaciones de usuarios

# Sensores OEM – Material particulado (PM)

- **Los sensores de PM actualmente usan sensores ópticos OEM**
  - Las partículas dispersan la luz de un láser o LED al moverse por la celda de medición
  - Se mide la luz dispersa mediante un detector y se usa la señal para estimar ya sea el volumen de un conjunto de partículas y/o el número de partículas en el aire
  - Luego se convierte la estimación del recuento en concentración de masa basándose en la calibración de masa o una estimación de densidad
- **Influencia de la humedad**
  - La mayor humedad causa el crecimiento de las partículas, lo cual aumenta el volumen de la partícula (pero no la masa real del PM)
  - Puede hacer que se sobreestime la masa



# Sensores OEM - Gases

- **Sensores electroquímicos**

- Sensibilidad a temperatura y humedad
- Baja potencia
- Sensibilidades cruzadas



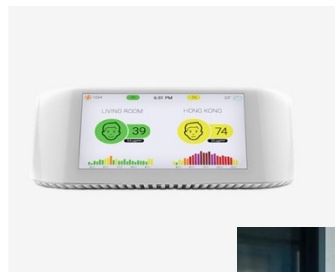
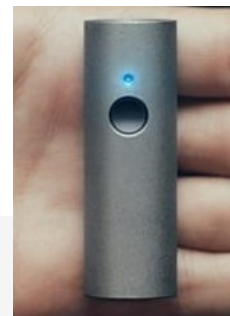
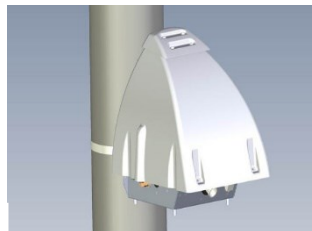
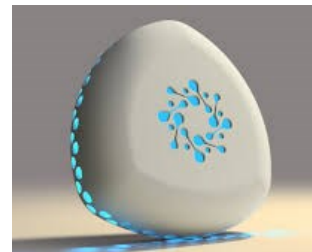
- **Sensores de óxido de metal**

- Mayor consumo de energía debido a que necesita calentar el sensor a 200-500° C para aumentar la sensibilidad y el tiempo de respuesta
- Arranque lento debido a que se precalienta el sensor
- Sensibilidad a baja humedad
- Sensibilidades cruzadas





# Sensores de aire disponibles en el comercio



# Gestión de datos del sensor

## Sensores



## Datos transmitidos...

Transmisión por  
Bluetooth al teléfono o  
aplicación del usuario

o

Módem Embedded Cell  
(o lo agrega el usuario)

o

No se transmiten ni  
guardan datos en la  
tarjeta de memoria

## Recibidos por...

Servidor/nube del  
fabricante

y/o

Servidor del  
usuario

## Y luego...

Se muestran datos  
brutos  
inmediatamente al  
público

o

Los datos brutos  
tienen acceso  
privado

o

Algoritmos ajustan  
datos, luego se  
comparten o se da  
acceso privado

## Consideraciones clave:

• *¿Dónde se guardan los datos?*

• *¿Qué volumen de datos debe gestionarse?*

• *¿Cómo se puede acceder a los datos?*

• *¿Quién es dueño de los datos?*

***¡Mucha variedad en el flujo de datos y la accesibilidad!***

# Ajustes de datos del sensor

## Los ajustes y algoritmos de datos adoptan muchas formas

- “Calibración” de fábrica → “Calibración” del fabricante → Colocalización de campo → Verificación de corrección de la red
- Corrección de datos aplicada por el fabricante → corrección de datos aplicada por el usuario
- Regresión lineal simple → modelo de datos más complicado → aprendizaje automático/inteligencia artificial (AI)

## Queda por debatir cuáles estrategias son razonables dependiendo de la aplicación

Tabla 1 Parámetros de ajuste de datos del sensor: Defendibles y objetables

parámetros defendibles	parámetros objetables
humedad relativa, según la cual se ha establecido una alteración en la medición	velocidad o dirección del viento
temperatura, según la cual se ha establecido una alteración en la medición	gases cuya sensibilidad cruzada no se ha indicado
otros gases cuya sensibilidad cruzada se ha establecido	datos de monitores vecinos (grado de referencia o sensor) que no se han demostrado como punto de referencia apto <sup>a</sup>
tiempo transcurrido desde la fabricación o el despliegue, si se ha demostrado que el envejecimiento causa cambios en la respuesta del sensor.	factores temporales aparte del tiempo transcurrido de uso (por ej., hora del día, día de la semana)
mediciones accesorias que señalan índice de refracción del aerosol, para los sensores de pm	altura de mezcla atmosférica
datos auto-cero, si está equipado con auto-cero	ubicación en relación con las fuentes (por ej., proximidad a una calle)
monitores en estrecha proximidad, si se establece que tienen datos comparables bajo condiciones específicas <sup>a</sup>	

<sup>a</sup>Esto es tema de investigación necesaria y específico del lugar, así como específico del contaminante.

# Características de rendimiento

**Los sensores tienen rendimientos variables – la evaluación antes del uso es crucial y lo más valioso es evaluar bajo condiciones similares al uso planeado.**

La **colocalización** es el proceso mediante el cual un monitor de referencia (FRM/FEM) y un monitor no de referencia (sensor) son operados al mismo tiempo y colocados bajo condiciones de la vida real durante un periodo definido de evaluación.

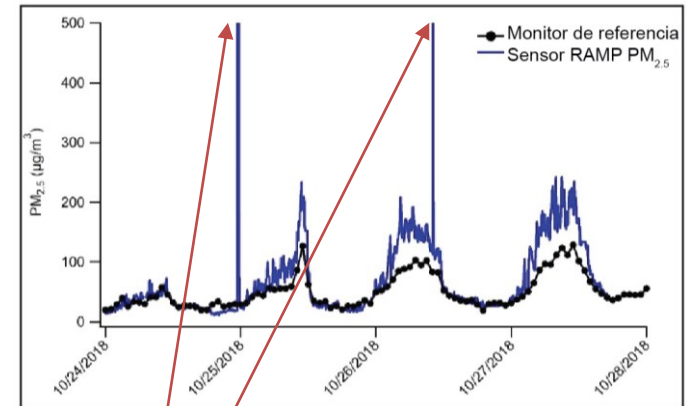
- Puede evaluarse el rendimiento del sensor comparando los datos con los de FRM/FEM
- Puede mejorar la exactitud de datos del sensor desarrollando una ecuación de ajuste de los datos
- Los periodos de colocalización antes y después del despliegue dan la oportunidad de evaluar la distorsión del sensor
  - Para despliegues largos, es útil la colocalización en medio del estudio



# Características de rendimiento

Son comunes las interferencias relacionadas con el medioambiente y el rendimiento puede cambiar con el paso del tiempo.

- **Humedad relativa** – La alta humedad puede hacer que los sensores de PM sobreestimen la concentración de masa. Los sensores de gas a menudo muestran sensibilidad.
- **Temperatura** – Los sensores pueden mostrar sensibilidad.
- **Co-contaminantes** – Los sensores pueden reaccionar ante otros contaminantes que pueden “interferir” con la manera en que responde el sensor al contaminante de interés.
- **Tiempo** – La distorsión puede ser obvia con el paso del tiempo. Los sensores pueden tornarse menos reactivos al envejecer.
- **Datos ruidosos** – Los puntos de datos espurios pueden ser obvios o no. Pueden relacionarse con errores de registro de datos, ruido electrónico, etc.



¿Evento transitorio real?  
¿Error de registro? ¿Problema del sensor?

# Características de rendimiento

La mayoría de los sensores reportan poco o nada de información de diagnóstico y no aportan un medio de verificar los parámetros operativos.

## Instrumentos de grado FRM/FEM

- Proporcionan información de diagnóstico como indicadores de estatus, índices de flujo, voltajes de bombillas internas, etc., que pueden servir como señales de advertencia sobre el deterioro del rendimiento
- Los operadores pueden validar independientemente algunos parámetros y efectuar trabajo de mantenimiento para que el instrumento permanezca funcionando óptimamente

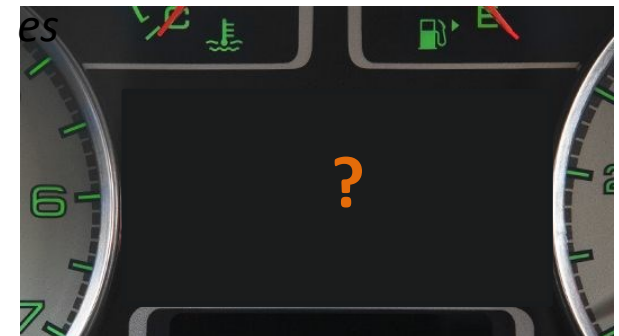
## Sensores

- Rara vez tienen información más allá de un timbre de hora y un valor de concentración
- Generalmente no están diseñados para verificaciones de validación ni mantenimiento

## Instrumentos



## Sensor

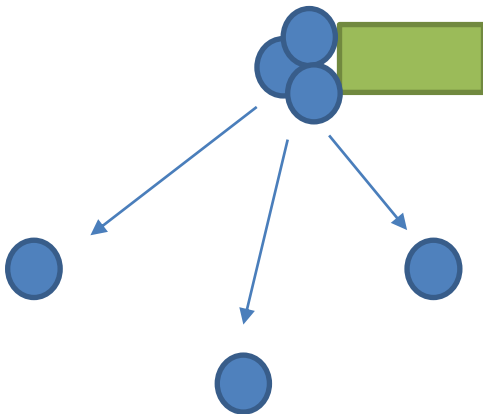


# Mejorar el rendimiento del sensor

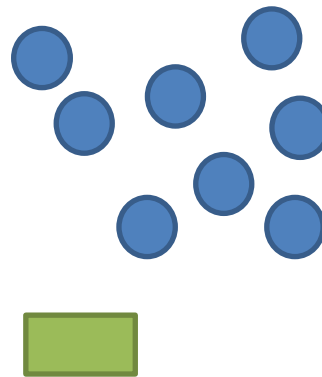
Hay una variedad de estrategias en desarrollo para superar los problemas de rendimiento del sensor.

1. Limpieza de datos
2. Promediar más tiempo
3. Algoritmos de ajuste de datos
4. Técnicas de calibración de la red

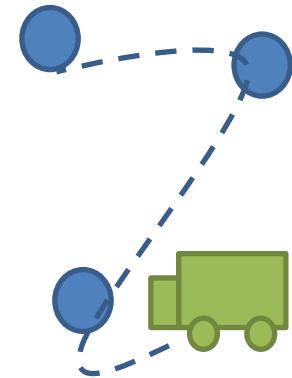
**Estrategia de capacitación:**  
*Colocalización con referencia por un momento, luego redespiegue en otro lugar*



**Estrategia de red:**  
*Comparar/corregir entre sitios vecinos*



**Red con referencia móvil:**  
*Calibración de la red desde un vehículo*



# Selección del método

**Los FRM/FEM y sensores aportan estrategias complementarias para medir la calidad del aire ambiental.**

**Al seleccionar un método, comience por formular algunas preguntas clave:**

1. ¿Por qué toma mediciones?
2. ¿Qué desea medir?
3. ¿Cómo se usarán los datos?
4. ¿Qué frecuencia de medición se necesita?
5. ¿Cuánto tiempo deberá tomar mediciones?
6. ¿Cómo verificará la calidad de los datos?



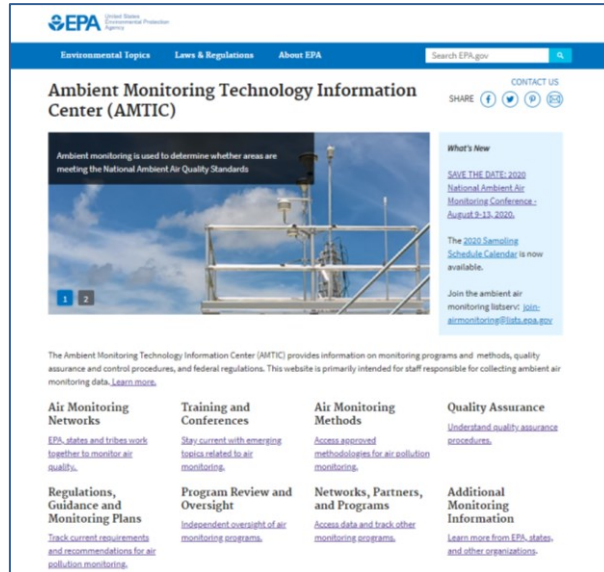
# Selección del método

**Los FRM/FEM y sensores aportan estrategias complementarias para medir la calidad del aire ambiente.**

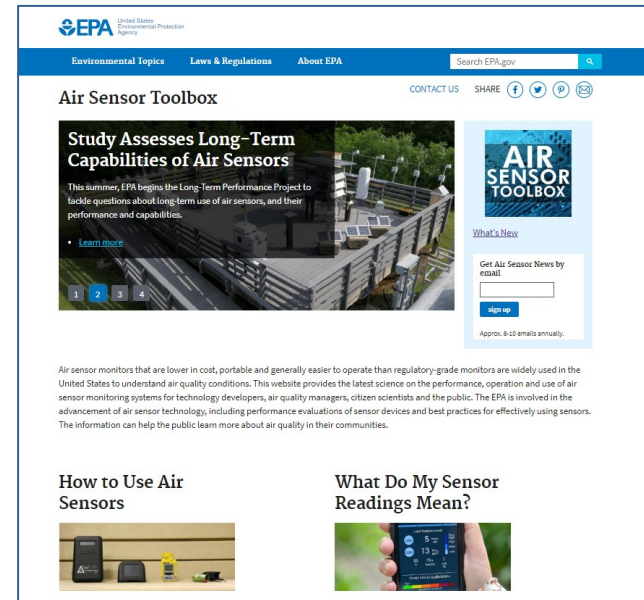


- Mediciones para uso reglamentario
  - Datos usados para decisiones de cumplimiento
  - Se necesita alta fidelidad en los datos
  - Se desean métodos establecidos de control y aseguramiento de calidad de datos
- Mediciones para uso no reglamentario
  - Se usan los datos para fines informativos
  - Exactitud o precisión demostrada es “aceptable” para la aplicación destinada
  - Los datos se desean con alta resolución de tiempo
  - Se necesitan dispositivos más pequeños o más portátiles
  - Limitaciones de costo, energía, necesidades de comunicación y/o restricciones de datos

# Recursos



Conozca más detalles sobre instrumentos FRM/FEM y procedimientos de aseguramiento y control de calidad en el **Centro de Información Tecnológica de Monitoreo Ambiental (AMTIC)**: [www.epa.gov/amtic](http://www.epa.gov/amtic)



Busque guías, recursos, evaluaciones de rendimiento e información sobre investigación en curso sobre sensores de aire en la **Caja de herramientas de sensores de aire**: [www.epa.gov/air-sensor-toolbox](http://www.epa.gov/air-sensor-toolbox)



# Contactos

## **Robert (Bob) Vanderpool** (Programa FRM/FEM)

Ingeniero de investigación de aerosol

Oficina de Investigación y Desarrollo de la EPA de los EE. UU.

[vanderpool.robert@epa.gov](mailto:vanderpool.robert@epa.gov)

919-541-7877

## **Andrea Clements** (Sensores de aire)

Científica física

Oficina de Investigación y Desarrollo de la EPA de los EE. UU.

[clements.andrea@epa.gov](mailto:clements.andrea@epa.gov)

919-541-1363

*Exención de responsabilidad: Las opiniones expresadas en esta presentación son las de su autor y no reflejan necesariamente las perspectivas o políticas de la EPA de los EE. UU. El hecho de mencionar nombres de marcas o productos comerciales no constituye consejo ni recomendación de uso.*