

Tecnologías basadas en microsensores para estudios de calidad del aire

Michel Grutter*¹, Armando Retama¹, Olivia Rivera², Jaime Contreras¹, Omar López¹, Sandra Porras¹,
Thania Arredondo¹, Eugenia González del Castillo¹

¹ Instituto de Ciencias de la Atmosfera y Cambio, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)

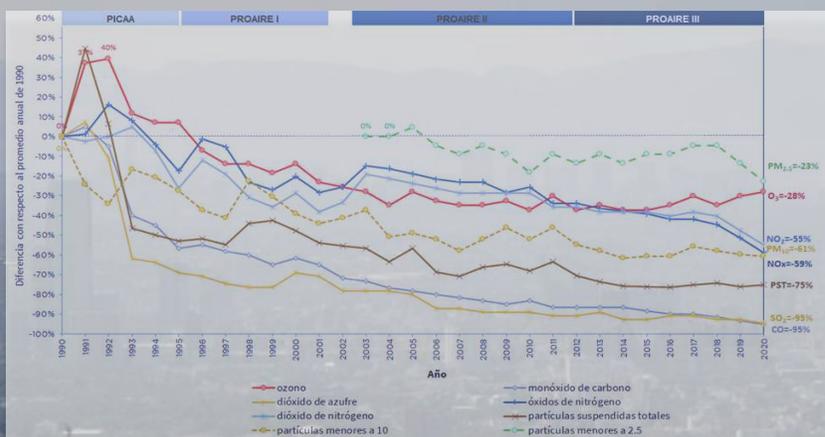
² Secretaría de Medio Ambiente, Gobierno de la Ciudad de México (SEDEMA – CDMX)



* grutter@unam.mx

Objetivos

- Evaluar el desempeño de tecnologías basadas en microsensores para el monitoreo de la calidad del aire en las condiciones ambientales de la Ciudad de México
- Obtener información cuantitativa sobre algunas métricas de desempeño para dispositivos de bajo costo
- Desarrollar un protocolo de evaluación siguiendo las mejores prácticas que pueda emplearse o mejorarse en ejercicios posteriores



Proyecto **SECTEI/190/2021**

EVALUACIÓN DE DISPOSITIVOS BASADOS EN MICROSENSORES PARA EL MONITOREO CONTINUO DE LA CALIDAD DEL AIRE



GOBIERNO DE LA
CIUDAD DE MÉXICO

SECRETARÍA DEL
MEDIO AMBIENTE

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN,
CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN

Componente 1: Ejercicio de evaluación de un conjunto de dispositivos comerciales basados en microsensores contra equipos de referencia, en dos sitios de la Ciudad de México con características meteorológicas y ambientales diferentes.

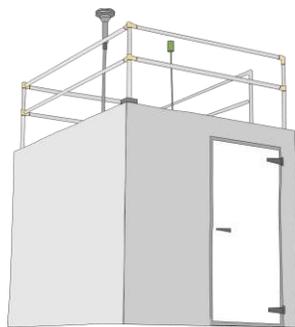
Componente 2: Instalación de una red de monitoreo utilizando dispositivos de microsensores y documentar la experiencia con el propósito de desarrollar una metodología para el despliegue de redes de monitoreo basadas en dispositivos de bajo costo.



Equipos de referencia

Ventajas

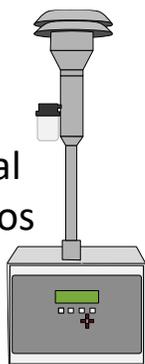
- Datos confiables
- Estabilidad
- Útiles para el seguimiento en la implementación de políticas públicas
- Alertar la población
- Métodos con reconocimiento para realización de investigaciones específicas



US\$ 110,000

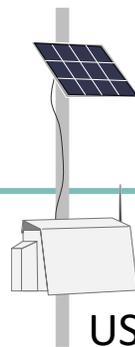
Desventajas

- Altos costos
- Sitios limitados de medición
- Poca representatividad espacial
- Limitado número de parámetros
- Requieren certificación

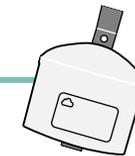


US\$ 5,000

Algunos tipos de microsensores

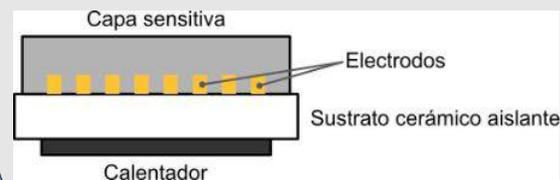


US\$ 15,000

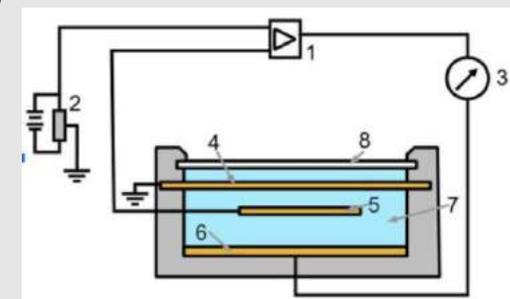


US\$ 250

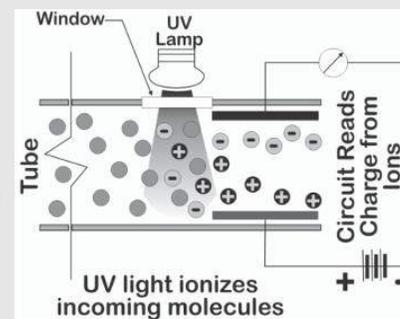
Sensores de óxidos metálicos



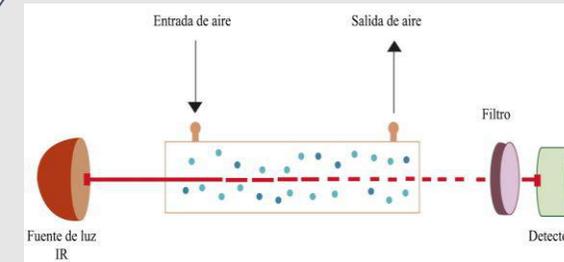
Sensores Electroquímicos



Detectores de fotoionización



Sensores Ópticos

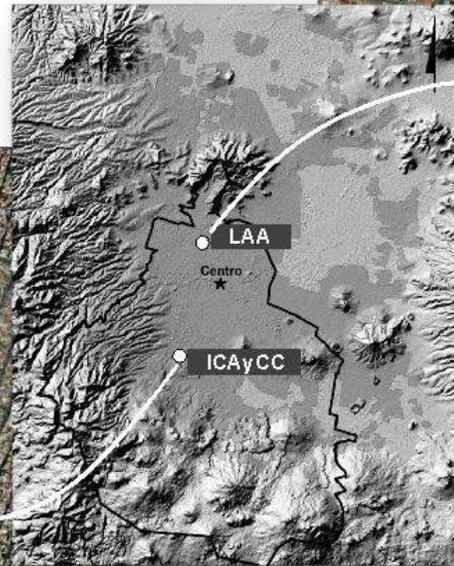


Componente 1. Evaluación de dispositivos de microsensores

Norte

Vallejo, laboratorio LAA del SIMAT

Lat: 19°29'01"N, long: 99°08'49"O, alt: 2245 msnm
25 de marzo – 20 de mayo de 2022



Sur

C. U., azotea del ICAyCC

Lat: 19°19'34", long: 99°10'34", alt: 2280 msnm
23 de mayo – 1 de julio de 2022

Proceso

- 1) Convocatoria
- 2) Registro de participantes
- 3) Recepción de equipos
- 4) Campañas de medición
- 5) Análisis de datos
- 6) Elaboración de informe



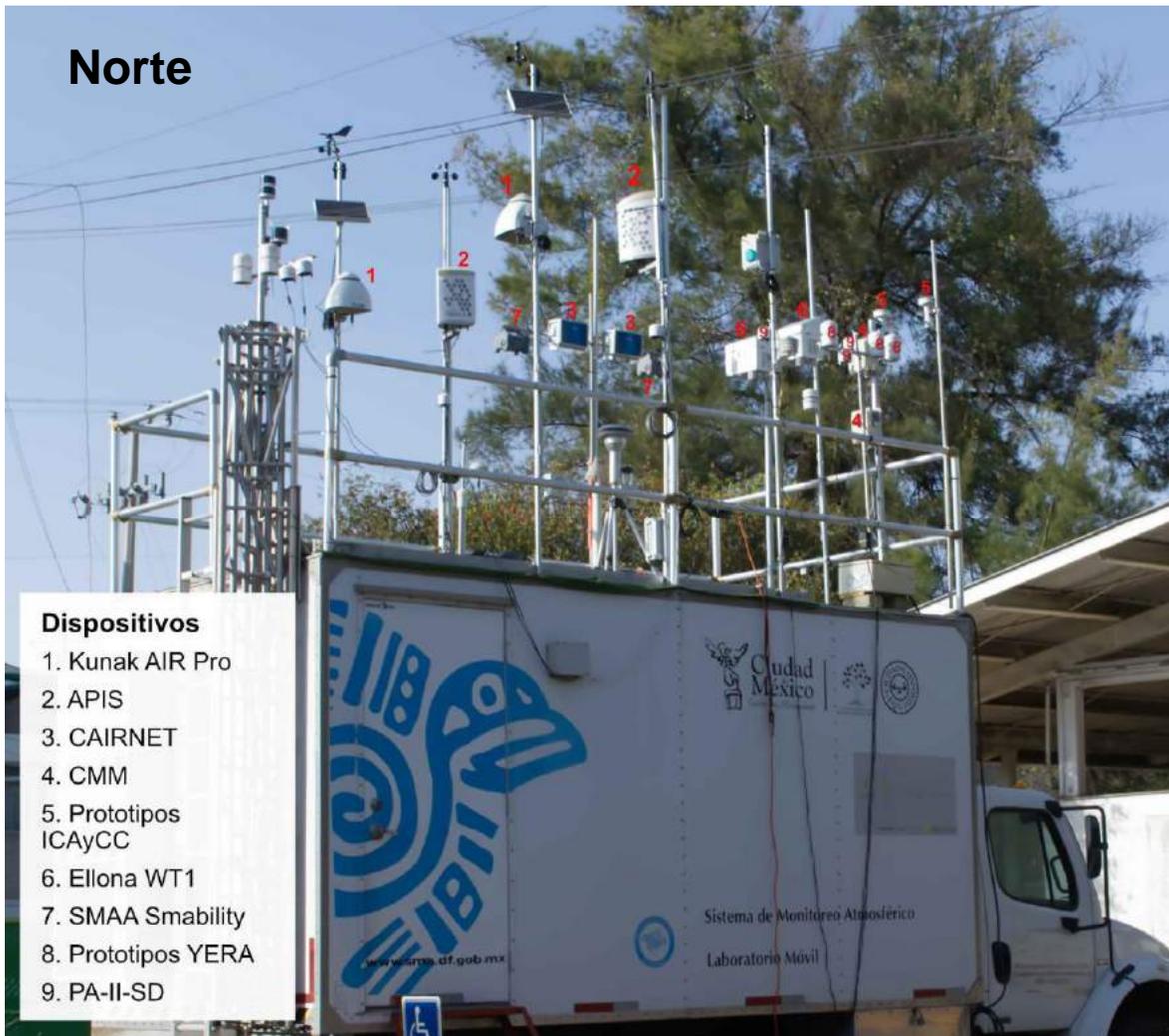
Evaluación: los dispositivos

Marca	Modelo	Configuración para contaminantes
Ellona	WT1	PM ₁₀ , PM _{2.5} , PM ₁ , O ₃ , NO ₂
ENVEA	Cairnet	PM ₁₀ , PM _{2.5} , PM ₁ , O ₃ , NO ₂
Kunak	Air Pro	PM ₁₀ , PM _{2.5} , PM ₁ , O ₃ , NO ₂ , CO, NO _x
Smability	SMAA	PM ₁₀ , PM _{2.5} , PM ₁ , O ₃ , CO
Tisch	APIS	PM ₁₀ , PM _{2.5} , PM ₁ , O ₃ , NO ₂ , CO, SO ₂
PurpleAir	PA-II-SD	PM ₁₀ , PM _{2.5} , PM ₁
Centro Mario Molina	CMM	PM ₁₀ , PM _{2.5} , O ₃ , NO ₂ , CO, SO ₂
DIY - ICAyCC	MPBU	PM ₁₀ , PM _{2.5} , PM ₁ , COV
DIY - Particular	YERA	PM ₁₀ , PM _{2.5} , PM ₁ , O ₃



Despliegue

Norte



Dispositivos

1. Kunak AIR Pro
2. APIS
3. CAIRNET
4. CMM
5. Prototipos ICAyCC
6. Ellona WT1
7. SMAA Smability
8. Prototipos YERA
9. PA-II-SD

Sur



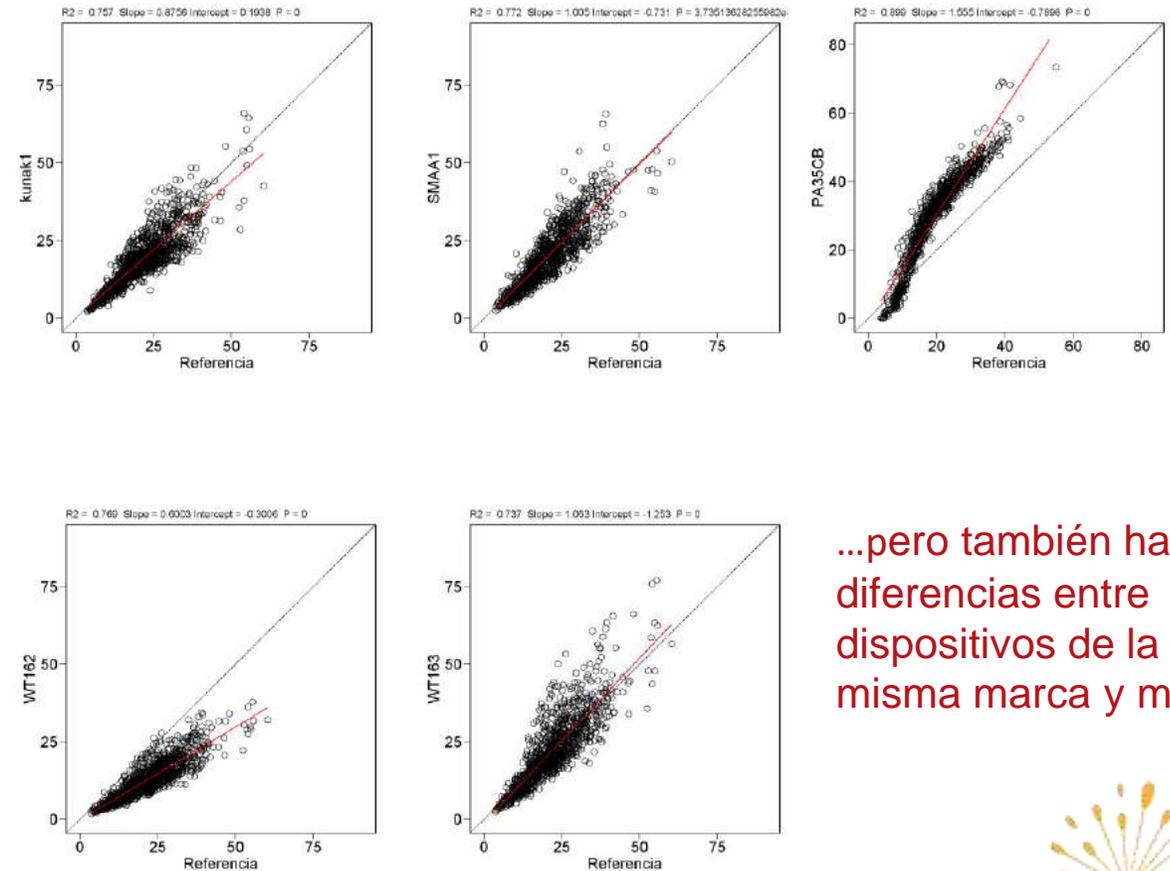
Dispositivos

1. APIS APM01
2. CMM Airlab
3. Ellona WT1
4. ENVEA Cairnet
5. Kunak AIR Pro
6. PurpleAir
7. Smability SMAA
8. Prototipo MPBU
9. Prototipo YERA

Análisis de datos

- Los datos se procesaron y analizaron siguiendo las recomendaciones de los documentos de la US EPA para la prueba básica (base test):
 - Performance Testing Protocols, Metrics, and Target Values for Fine Particulate Matter Air Sensors.
 - Performance Testing Protocols, Metrics, and Target Values for Ozone Air Sensors
- Las **métricas** calculadas fueron:
 - Sesgo y linealidad (R^2 , m, b), error (RMSE, NRMSE), precisión (desviación estándar y coeficiente de variación).
- Adicionalmente se estimaron los coeficientes de **correlación** (Spearman y de Kendall).
- Se evaluó el **efecto meteorológico** graficando los valores normalizados contra la temperatura y humedad relativa.

Encontramos diferencias en la respuesta entre dispositivos de distintas marcas (y diferente sensor)



...pero también hay diferencias entre dispositivos de la misma marca y modelo



PM2.5

Análisis de datos

Información del evaluador

Institución: Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático-UNAM, Dirección de Monitoreo de la Calidad del Aire-SEDEMA

Ubicación del sitio de prueba: Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, Ciudad Universitaria, Coyoacán, Ciudad de México

Lat.: 19.326° Long.: -99.176° Altitud: 2290 m

Información del dispositivo SMABILITY

Marca y modelo: SMABILITY modelo SMAA
Versión de firmware: —

Intervalo de muestreo: 5 minutos

Números de serie: SMAA-1, SMAA-2

Problemas identificados durante el despliegue:

El dispositivo SMAA-2 presentó algunas intermitencias en la transmisión de datos.

Información del equipo de referencia para PM_{2.5}

Marca y modelo: Teledyne API modelo T-API640x
Número de serie: 492

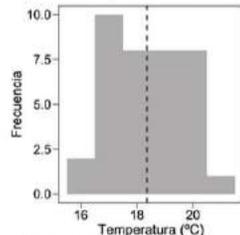
Intervalo de muestreo: 1 minuto

Fecha de calibración: 20 de enero de 2022

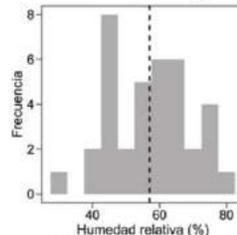
Fecha de verificación del flujo: 23 de mayo de 2022

Observaciones: La respuesta del equipo se ajustó contra un FRM.

Temperatura y humedad ambientales durante el despliegue

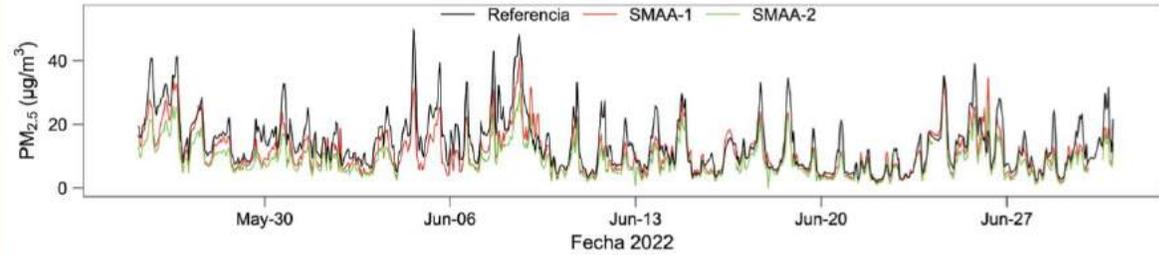


Número de periodos de 24 horas fuera del límite de temperatura recomendado por el fabricante: 0

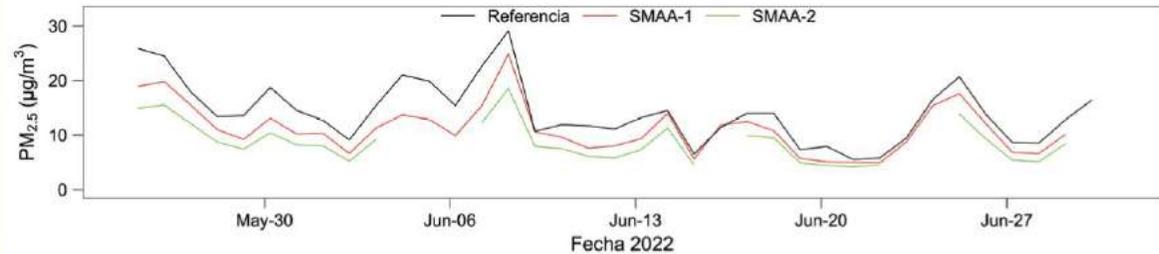


Número de periodos de 24 horas fuera del límite de temperatura recomendado por el fabricante: 0

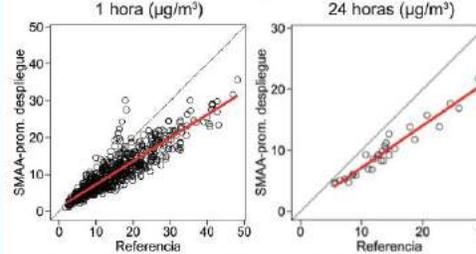
Serie de tiempo, promedio de 1 hora



Serie de tiempo, promedio de 24 horas

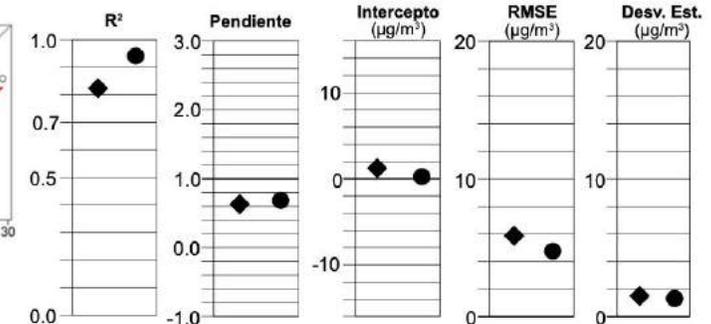


Comparación con el equipo de referencia

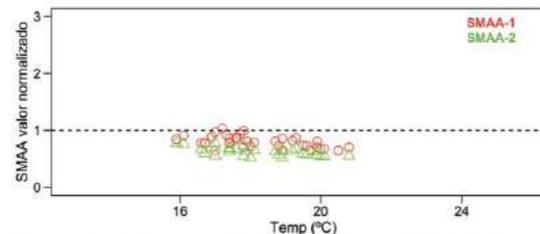


Intervalos de concentraciones medidas por el equipo de referencia (µg/m³): 1.7 a 49.9 (1-h), 5.5 a 29.1 (24-h)
Número de periodos de 24 horas con concentraciones mayores a la NOM (>41 µg/m³): 0

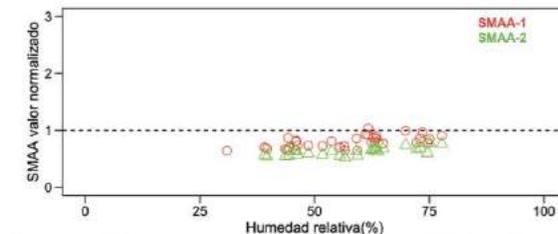
Métricas de desempeño ◆1-h ●24-h



Efecto de las condiciones ambientales



Número de datos (prom. 24-h): SMAA-1=37, SMAA-2=30
Temperatura promedio: 18.3 °C



Número de datos (prom. 24-h): SMAA-1=37, SMAA-2=30
Humedad relativa promedio: 57 %



PM2.5

Análisis de datos

Estadísticas

	Número de datos pareados		Promedio ± desv. est.		Mediana		Mín (Máx)	
	1 hora	24 horas	1 hora	24 horas	1 hora	24 horas	1 hora	24 horas
Referencia ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	769	30	14.0 ± 8.4	13.9 ± 6.0	12.2	13.3	1.7 (48.2)	5.5 (29.1)
SMAA-1 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	769	30	11.0 ± 6.6	10.9 ± 4.9	9.2	10.3	1.2 (41.0)	4.9 (24.9)
SMAA-2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	769	30	8.7 ± 5.1	8.7 ± 3.7	7.4	8.1	0.0 (30.2)	4.2 (18.5)
---	---	---	---	---	---	---	---	---

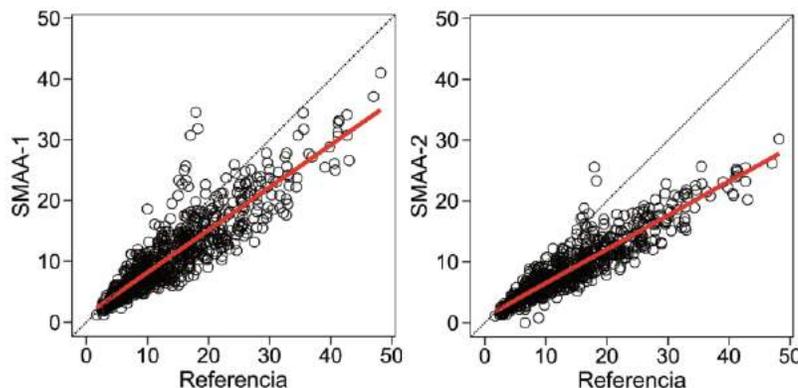
Resultados de la evaluación

	Sesgo y linealidad							
	R ²		Pendiente		Intercepto ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		Spearman (Kendall)	
	1 hora	24 horas	1 hora	24 horas	1 hora	24 horas	1 hora	24 horas
SMAA-1	0.797	0.934	0.70	0.79	1.18	0.03	0.906 (0.738)	0.948 (0.826)
SMAA-2	0.849	0.936	0.56	0.59	0.91	0.43	0.924 (0.766)	0.961 (0.863)
---	---	---	---	---	---	---	---	---
Promedio del despliegue	0.827	0.937	0.63	0.69	1.05	0.23	0.919 (0.755)	0.954 (0.852)

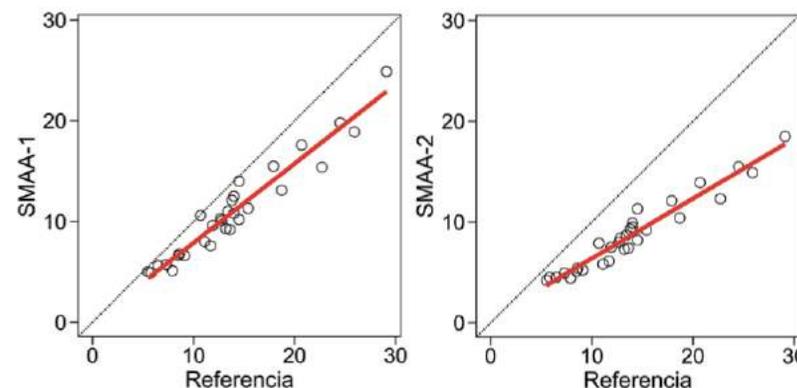
Promedio del despliegue ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Error				Precisión				Captura de datos (%)			
	RMSE ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		NRMSE (%)		Desv. est. ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		CV (%)					
	1 hora	24 horas	1 hora	24 horas	1 hora	24 horas	1 hora	24 horas	1 hora	24 horas		
	9.8	9.8	5.9	4.8	42.2	34.2	1.5	1.3	14.9	13.2	86	79

Gráficos de regresión individuales para los dispositivos contra el equipo de referencia

Promedios de 1 hora ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)



Promedios de 24 horas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)



Partículas PM2.5

Dispositivo	Promedio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Linealidad			Error		Precisión		S	τ	Datos %
		R ²	m	b	RMSE ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	NRMSE (%)	DE ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	CV (%)			
Sitio de evaluación: LAA, promedio de 1 hora (promedio= 21.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)											
CMM/Airlab	26.1	0.272	0.61	12.99	10.8	50.0	2.7	10.5	0.644	0.463	90
Ellona/WT1	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
ENVEA/Cairnet	18.4	0.821	0.92	-1.33	5.0	23.2	0.5	2.5	0.906	0.913	100
Kunak/AIR pro	19.1	0.766	0.88	0.01	5.3	24.4	1.2	6.3	0.886	0.716	97
PurpleAir/II-SD	30.7	0.898	1.55	-0.24	10.1	50.7	0.6	2.1	0.973	0.861	78
Smability/SMAA	18.4	0.795	0.91	-0.94	5.6	26.4	2.5	13.4	0.906	0.735	84
YERA	19.0	0.878	1.13	-3.35	3.1	15.8	0.6	3.4	0.942	0.801	58
Sitio de evaluación: ICAYCC, promedio de 1 hora (promedio= 14.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)											
CMM/Airlab	17.9	0.344	0.32	14.03	8.5	70.5	1.4	7.8	0.700	0.522	63
Ellona/WT1	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
ENVEA/Cairnet	10.5	0.840	0.74	0.07	5.1	35.9	0.5	4.9	0.925	0.766	100
Kunak/AIR pro	11.5	0.828	0.90	-1.28	4.5	31.9	0.6	5.5	0.940	0.793	100
MPBU	16.4	0.764	1.52	-0.09	8.7	80.3	1.7	10.3	0.811	0.641	27
PurpleAir	18.1	0.851	1.44	-2.39	6.0	42.6	0.3	1.7	0.931	0.780	100
Smability/SMAA	9.8	0.827	0.63	1.05	5.9	42.2	1.5	14.9	0.919	0.755	86
YERA	13.1	0.840	0.99	-2.12	3.6	23.7	0.4	2.7	0.922	0.759	77





Análisis de datos

Información del evaluador

Institución: Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático-UNAM, Dirección de Monitoreo de la Calidad del Aire-SEDEMA

Ubicación del sitio de prueba: Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, Ciudad Universitaria, Coyoacán, Ciudad de México

Lat.: 19.326° Long.: -99.176° Altitud: 2290 m

Información del dispositivo ENVEA

Marca y modelo: ENVEA modelo CAIRNET

Versión de firmware: ---

Intervalo de muestreo: 1 minutos

Números de serie: CXM22020313, CZM22020314

Problemas identificados durante el despliegue:
No se identificaron problemas durante la operación.

Información del equipo de referencia para O₃

Marca y modelo: Teledyne API modelo 400E

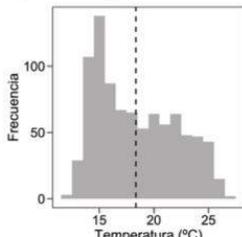
Número de serie: 1208

Intervalo de muestreo: 1 minuto

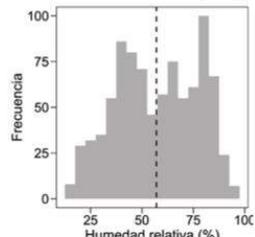
Fecha de calibración: 23 de mayo de 2022

Observaciones: El instrumento operó sin problemas, se realizaron verificaciones de la respuesta del instrumento una vez cada seis días.

Temperatura y humedad ambientales durante el despliegue

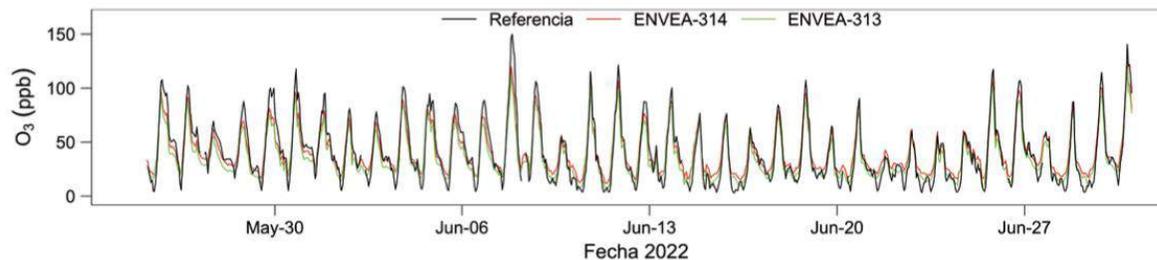


Número de periodos de 1 hora fuera del límite de temperatura recomendado por el fabricante: 0

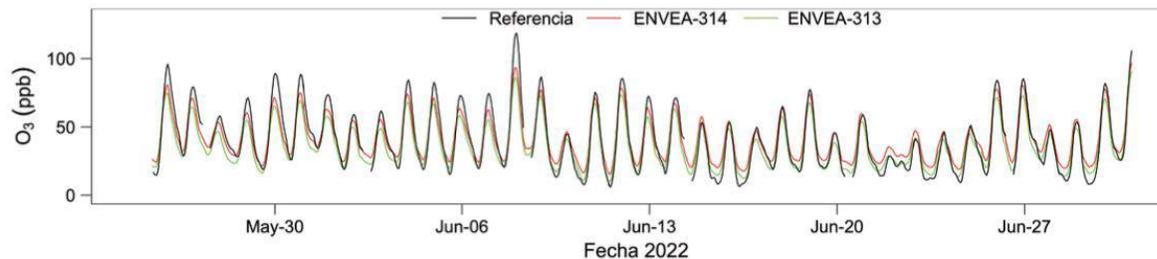


Número de periodos de 1 hora fuera del límite de temperatura recomendado por el fabricante: 0

Serie de tiempo, promedio de 1 hora

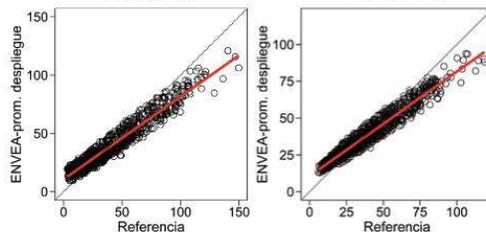


Serie de tiempo, promedio de 8 horas



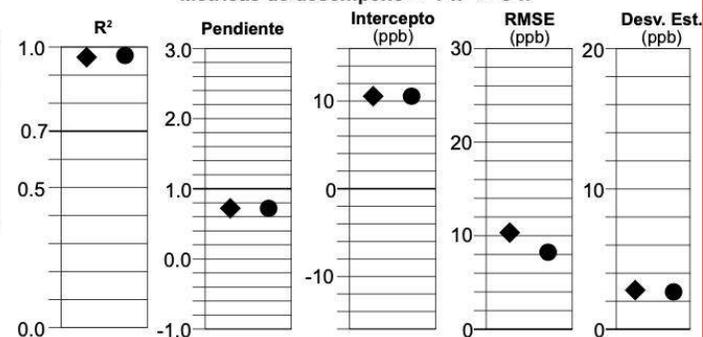
Comparación con el equipo de referencia

1 hora (ppb) 8 horas (ppb)

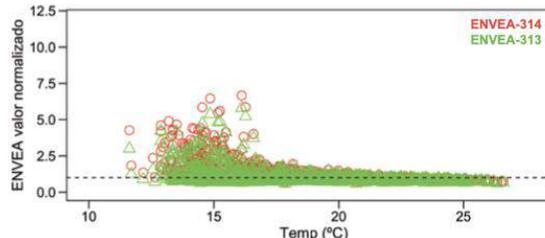


Intervalos de concentraciones medidas por el equipo de referencia (ppb): 3.1 a 149.8 (1-h), 6.0 a 118.6 (8-h)
Número de periodos de 24 horas con concentraciones mayores a la NOM: 61 (1-h, 90 ppb), 142 (8-h, 65 ppb)

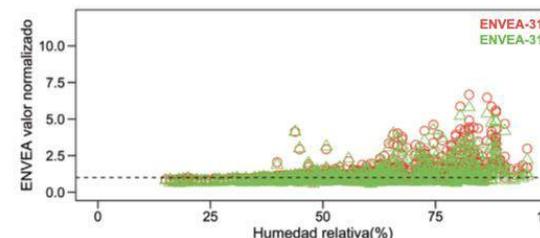
Métricas de desempeño



Efecto de las condiciones ambientales



Número de datos (prom. 1-h): ENVEA-313=877, ENVEA-314=877
Temperatura promedio: 18.3 °C



Número de datos (prom. 1-h): ENVEA-313=877, ENVEA-314=877
Humedad relativa promedio: 57 %





Análisis de datos

Estadísticas

	Número de datos pareados		Promedio ± desv. est.		Mediana		Mín (Máx)	
	1 hora	8 horas	1 hora	8 horas	1 hora	8 horas	1 hora	8 horas
Referencia (ppb)	877	855	40.0 ± 28.1	40.4 ± 22.3	33.5	36.0	3.1 (149.8)	6.0 (118.6)
ENVEA-314 (ppb)	877	855	41.6 ± 20.9	42.0 ± 16.5	34.9	38.7	11.8 (125.0)	15.5 (96.8)
ENVEA-313 (ppb)	877	855	36.2 ± 20.6	36.6 ± 16.3	30.0	33.3	6.6 (116.8)	10.1 (90.8)
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Resultados de la evaluación

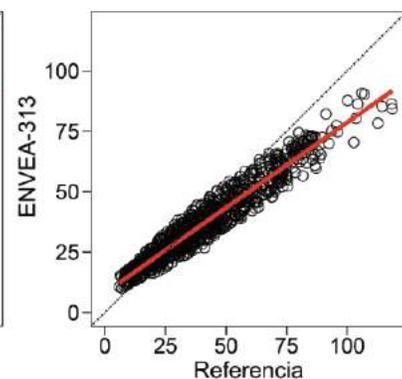
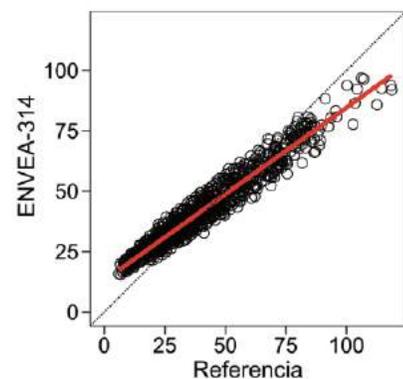
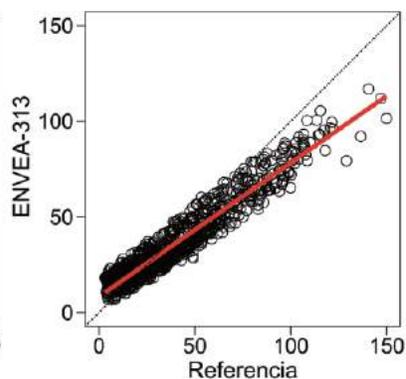
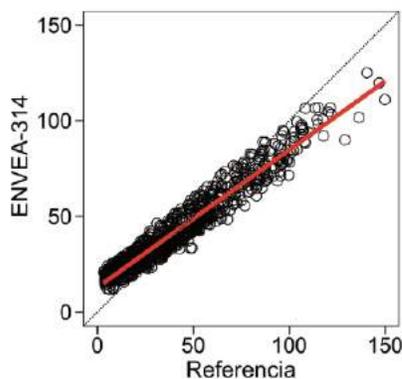
	Sesgo y linealidad							
	R ²		Pendiente		Intercepto (ppb)		Spearman (Kendall)	
	1 hora	8 horas	1 hora	8 horas	1 hora	8 horas	1 hora	8 horas
ENVEA-314	0.937	0.945	0.72	0.72	12.85	13.00	0.958 (0.822)	0.970 (0.848)
ENVEA-313	0.916	0.931	0.70	0.71	8.25	8.10	0.938 (0.784)	0.961 (0.827)
---	---	---	---	---	---	---	---	---
Promedio del despliegue	0.928	0.939	0.71	0.71	10.55	10.55	0.950 (0.804)	0.967 (0.839)

Promedio del despliegue (ppb)	Error				Precisión				Captura de datos (%)	
	RMSE (ppb)		Desv. est. (ppb)		CV (%)					
	1 hora	8 horas	1 hora	8 horas	1 hora	8 horas	1 hora	8 horas		
38.9	39.3	10.3	8.2	2.8	2.7	7.2	7.0	100	100	

Gráficos de regresión individuales para los dispositivos contra el equipo de referencia

Promedios de 1 hora (ppb)

Promedios de 8 horas (ppb)



Ozono (O₃)

Dispositivo	Promedio (ppb)	Linealidad			Error RMSE (ppb)	Precisión		S	τ	Datos %
		R ²	m	b		DE (ppb)	CV (%)			
Sitio de evaluación: LAA, promedio de 1 hora (promedio= 39.8 ppb)										
CMM/Airlab	557.4	0.000	0.00	557.2	519.2	11.2	2.0	0.011	0.025	88
APIS/APM01	34.3	0.865	0.98	-3.37	14.9	5.8	17.0	0.931	0.766	97
Ellona/WT1	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
ENVEA/Cairnet	36.0	0.822	0.50	16.45	19.5	4.2	11.5	0.903	0.737	99
Kunak/AIR pro	39.3	0.964	0.99	0.52	10.7	8.4	21.5	0.978	0.874	99
Smability/SMAA	42.1	0.071	0.13	37.10	34.0	5.0	11.8	0.209	0.157	83
Sitio de evaluación: ICAyCC, promedio de 1 hora (promedio= 40.0 ppb)										
CMM/Airlab	571.8	0.880	0.20	564.2	534.3	12.6	2.2	0.270	0.184	62
APIS/APM01	17.0	0.833	0.71	-11.50	26.1	2.8	16.6	0.950	0.807	100
Ellona/WT1	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
ENVEA/Cairnet	38.9	0.928	0.71	10.55	10.3	2.8	7.2	0.950	0.804	100
Kunak/AIR pro	40.6	0.966	0.92	3.71	8.7	6.8	16.8	0.978	0.875	100
Smability/SMAA	45.1	0.452	0.47	25.63	21.6	3.2	7.0	0.652	0.464	85

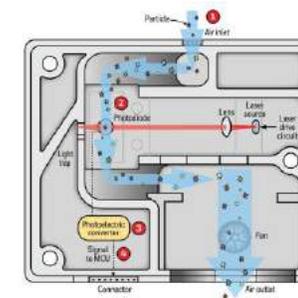
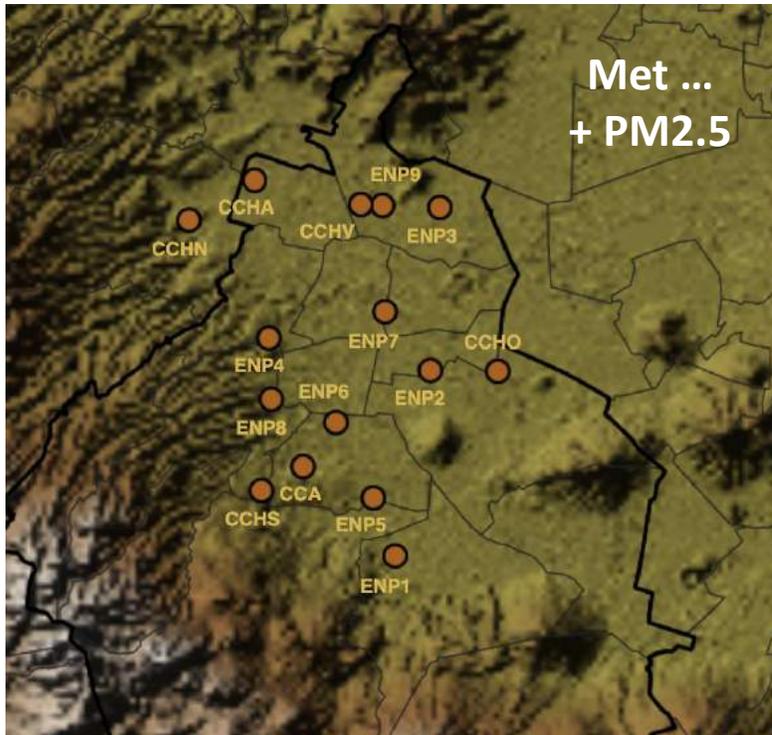


Componente 2. Despliegue de una red piloto

Programa de estaciones
Meteorológicas del Bachillerato
Universitario (UNAM)



Capacitación a profesores de bachillerato



Esquema de un sensor óptico para PM (Imagen: <https://help.atmotube.com/technical/3-atmotube-pm/>).

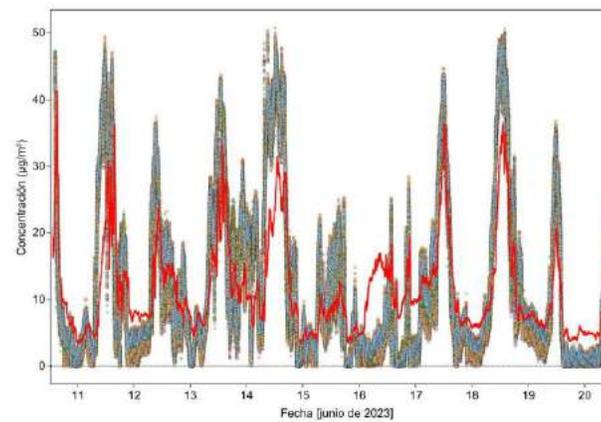
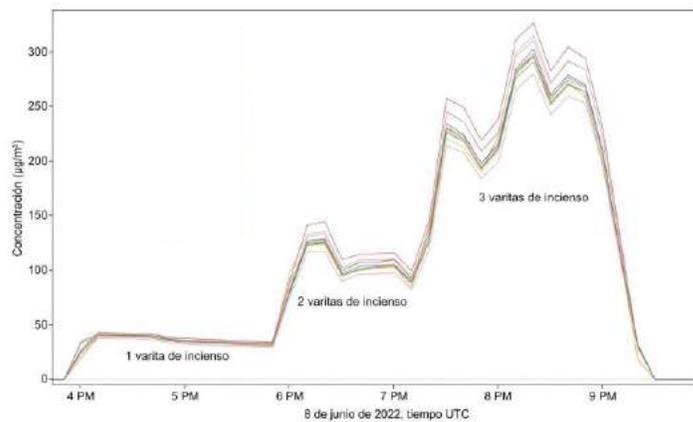
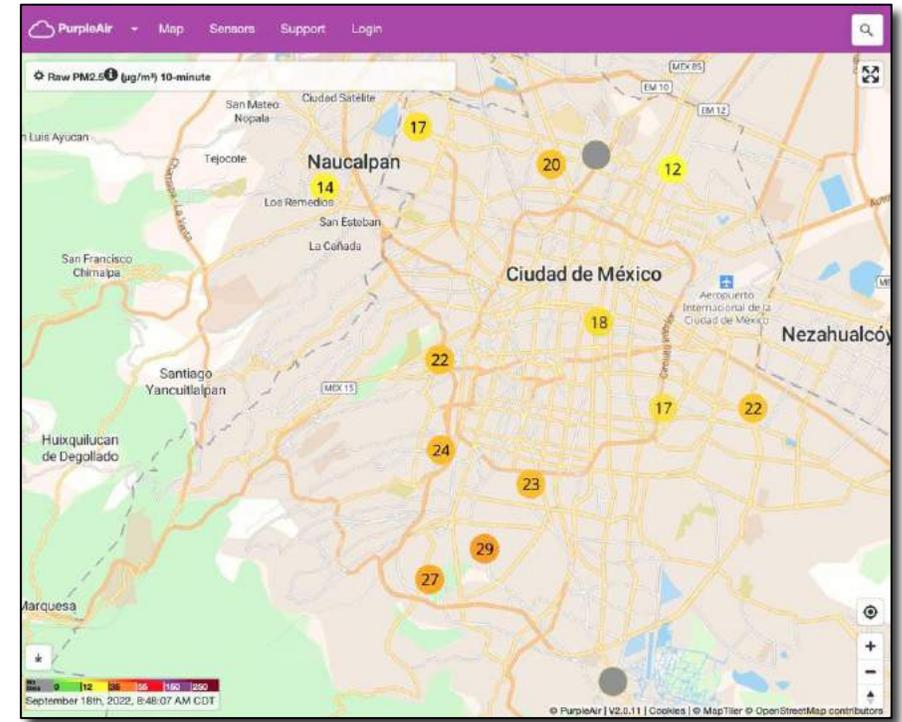
Componente 2. Despliegue de una red piloto

Verificación de dispositivos

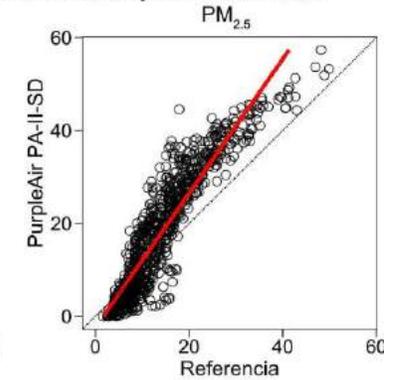
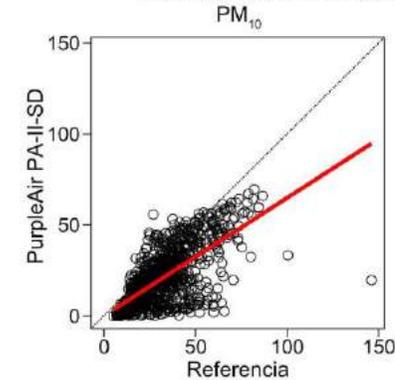
en condiciones controladas



en aire ambiente

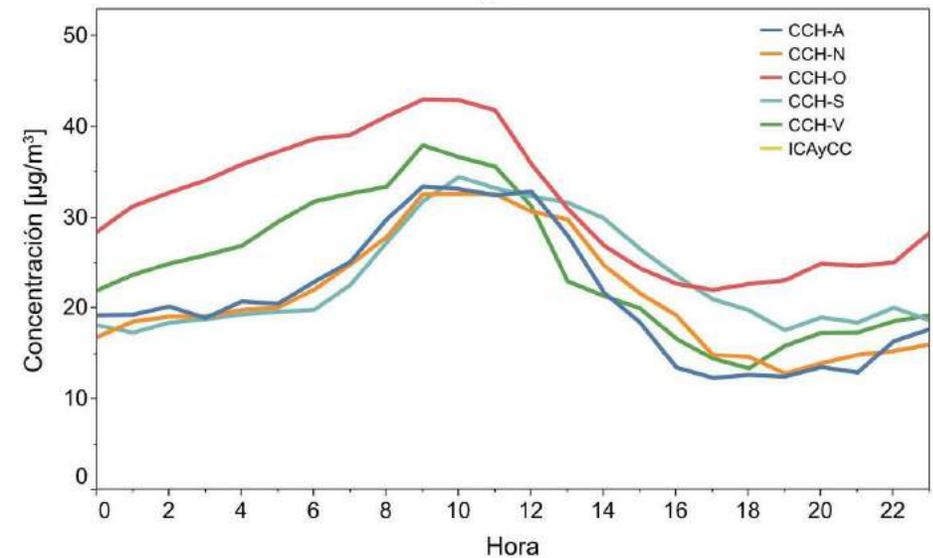
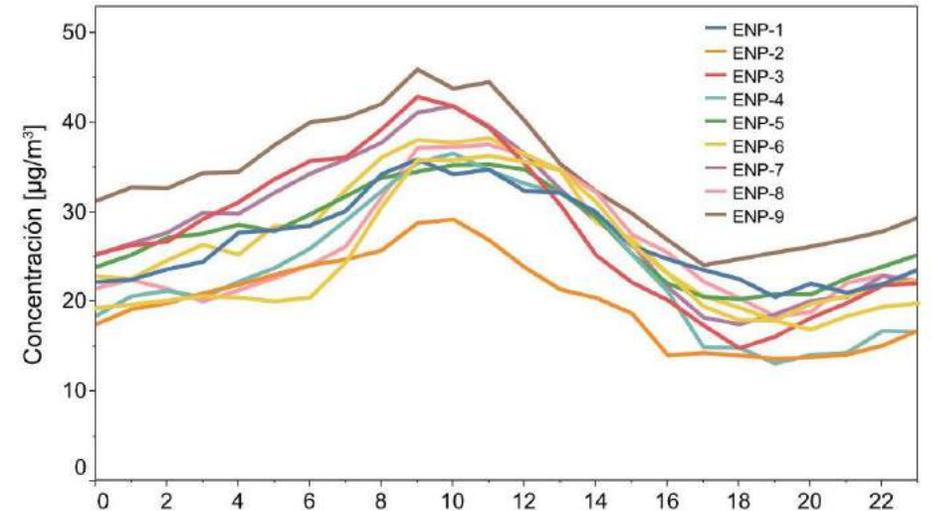
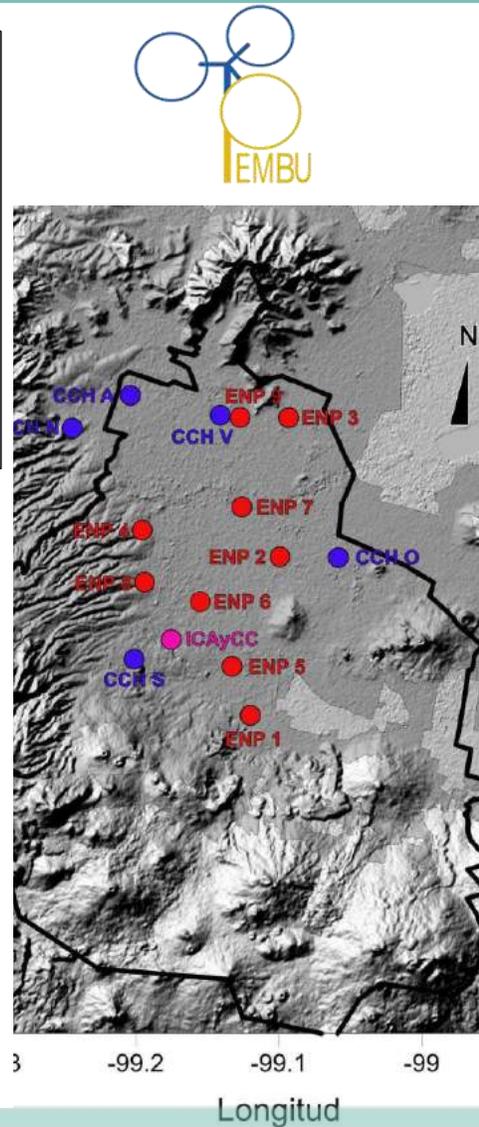
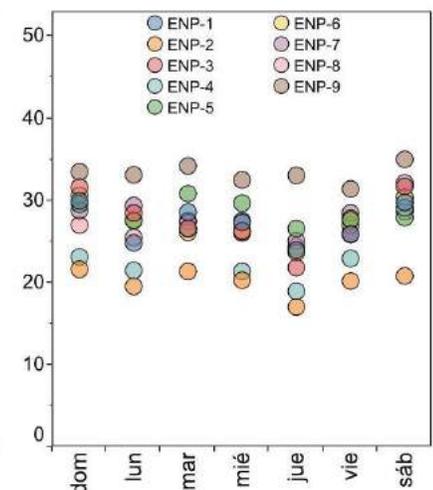
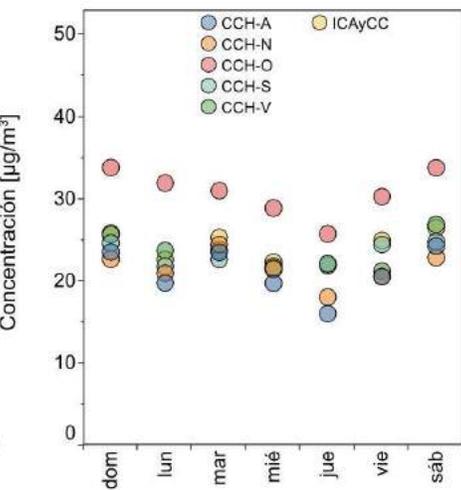
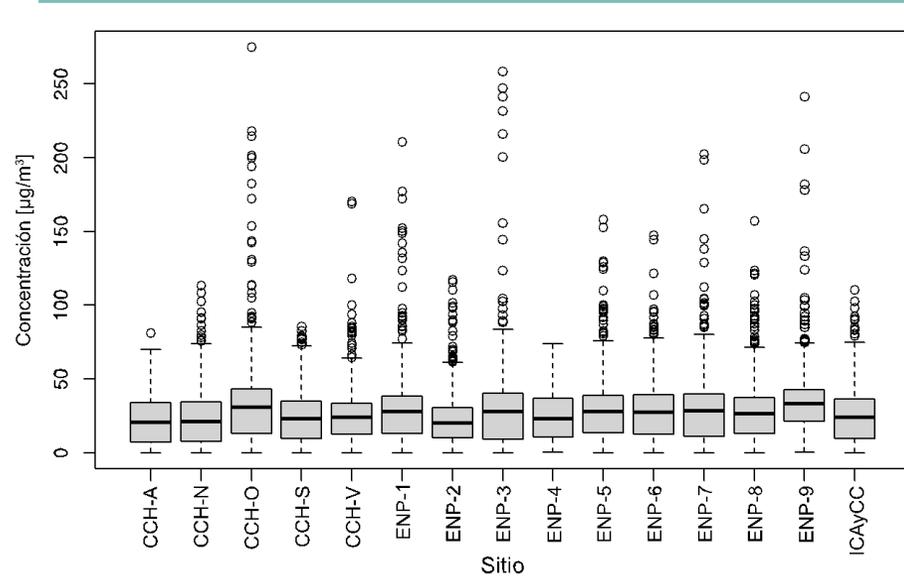


Sitio: Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático



Componente 2. Despliegue de una red piloto

Programa de estaciones Meteorológicas del Bachillerato Universitario (UNAM)



Conclusiones (Evaluación)

- El **precio** no necesariamente se equipara a la calidad de los resultados en términos de exactitud y precisión.
- Los sensores son dependientes de las **condiciones ambientales** por lo que cambios atmosféricos en humedad relativa y temperatura tienen un efecto sobre la medición de varios de estos contaminantes.
- En general, los equipos **multi-contaminantes** pueden sufrir de una mayor pérdida de datos debido a la interacción y dependencia interna de funciones de los sensores.
- **Post-procesamiento**, tomando en cuenta las variables ambientales, puede mejorar significativamente los resultados y ya varios desarrolladores están incluyendo en su tratamiento de datos correcciones de tipo multi-variable
- La **composición química y forma aerodinámica de las partículas** suspendidas en el aire tiene un efecto sobre la medición y cálculo de las concentraciones que reportan los sensores de bajo costo. Se esperan cambios en el desempeño cuando la mezcla de aire cambia significativamente.



Conclusiones (Despliegue de una red de bajo costo)

- **Costo:** El ahorro conseguido para la compra inicial de algunos sensores requiere de inversión posterior para sufragar costos de adquisición de datos, mantenimiento, reparación y soporte técnico, que puede superar fácilmente la inversión inicial.
- **QA/QC:** Ninguno de los fabricantes o proveedores ofrecen servicios de aseguramiento y control de calidad, y el análisis de datos está limitado a las opciones del paquete de software. El análisis comparativo para diagnóstico y calibración con equipos de referencia, incluyendo un programa continuo de seguimiento, es parte de las **buenas prácticas** recomendadas en la operación de estas redes.
- **Parametros ambientales:** No todos los dispositivos incorporan mediciones meteorológicas, esto es recomendable en un sistema integral de medición, en algunos casos resulta crítico la información climatológica para el análisis e interpretación de las mediciones.
- **Red ciudadana vs. DIY:** Algunos desarrolladores establecen restricciones fuertes en el acceso de los datos de otros usuarios e inclusive de los sensores propios, lo que motiva el desarrollo de redes tipo *DIY*





¡Gracias por su atención!



Michel Grutter^{*1}, Armando Retama¹, Olivia Rivera², Jaime Contreras¹, Omar López¹, Sandra Porras¹,
Thania Arredondo¹, Eugenia González del Castillo¹



Contacto:

* grutter@unam.mx

Más información:

<http://www.epr.atmosfera.unam.mx/Microsensores-2022/>