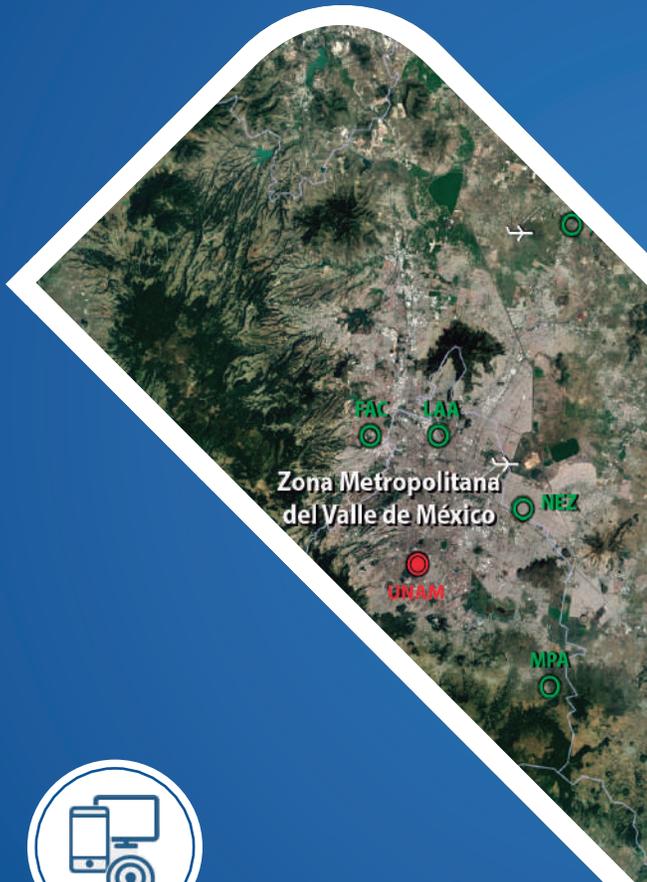




4

DISEÑO Y DESPLIEGUE DE UNA RED PILOTO PARA LA MEDICIÓN DE CO₂ CON UN SISTEMA DE MICROSENSORES



CO₂



INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA
ATMÓSFERA
Y CAMBIO CLIMÁTICO

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



INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA
ATMÓSFERA
Y CAMBIO CLIMÁTICO



GOBIERNO DE LA
CIUDAD DE MÉXICO

SECRETARÍA DEL
MEDIO AMBIENTE

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN
CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN

Diseño y despliegue de una red piloto para la medición de CO₂ con un sistema de microsensores

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

Sandra Porras^{1,2}, Eugenia González del Castillo^{1,4}, Omar López^{1,4}, Thania Arredondo^{1,2}, Olivia Rivera³, Michel Ramonet⁵, Olivier Laurent⁵, Michel Grutter^{1*}

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

² Posgrado en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)

³ Dirección de Monitoreo de la Calidad del Aire. Secretaría de Medio Ambiente, Gobierno de la Ciudad de México

⁴ Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos, UNAM

⁵ Laboratoire des Sciences de Climat et de l'Environnement (LSCE), Francia

* responsable técnico del proyecto

Índice

1	INTRODUCCIÓN	3
1.1	Motivación.....	3
1.2	Antecedentes.....	4
1.3	Objetivo.....	5
2.	ESTRUCTURA Y FUNCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO	6
3.	CARACTERIZACIÓN DE LOS PROTOTIPOS	12
3.1	Impacto de la presión barométrica.....	12
3.2	Procedimientos de calibración.....	14
3.3	Deriva instrumental: uso de un tanque de seguimiento (<i>target</i>).....	19
3.4	Otros retos.....	20
4.	IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED DE MONITOREO	23
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	22
6.	REFERENCIAS	26
	ANEXO FOTOGRÁFICO	28

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

El reporte más reciente (AR6) del Panel Intergubernamental de Cambio Climático identifica a los asentamientos urbanos y su expansión como factores centrales tanto de las tendencias de incremento de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) como de su mitigación a escala global (Lwasa et al., 2022). Se estima que la porción de GEI de origen urbano ha pasado de constituir un 62% de las emisiones globales en 2015 a un 67-72% en 2020; en la región de Latinoamérica y el Caribe, el incremento estimado va del 55% al 66% en el mismo periodo (Lwasa et al., 2022). En este contexto, la cuantificación oportuna y exhaustiva de las emisiones de GEI en las ciudades adquiere una gran importancia. Las políticas públicas de mitigación de los efectos del cambio climático serán más efectivas en la medida en la que la representación de las fuentes y sumideros de GEI en la ciudad sea más certera espacialmente, y su dinámica sea mejor entendida.

Los inventarios de emisiones –y los modelos en los que se emplean– siguen siendo la herramienta principal de cuantificación y análisis de emisiones de GEI para gobiernos, organizaciones y empresas. Los inventarios se basan en catálogos detallados de datos de actividad y factores de emisión en los diferentes sectores responsables de las emisiones y consumos de GEI, directos e indirectos, que son después agrupados por sector y aún por jurisdicción política, y a los cuales se asocia un nivel de incertidumbre (SEDEMA, 2021; Gobierno de México, SEMARNAT e INECC, 2022). La elaboración de un inventario exhaustivo es una labor compleja y lenta, que 1) generalmente carece de una validación independiente, y 2) por su naturaleza es incapaz de reflejar la dinámica en la distribución de las fuentes y sumideros en una ciudad en un momento dado, particularmente cuando los procesos de expansión urbana son acelerados. Por estas razones, ha surgido interés en los últimos años en un monitoreo directo de la atmósfera urbana, que capture los cambios en los gradientes de concentración de GEI en la superficie y que sirva como un instrumento de validación externa de los inventarios de emisiones.

La medición directa de GEI y otros contaminantes atmosféricos se ha llevado a cabo tradicionalmente con equipos de alto costo de adquisición, instalación y mantenimiento, lo que hace incosteable la densificación de las redes de medición. Como resultado, aún en las urbes donde se lleva a cabo el monitoreo de superficie, éste carece de la resolución espacial necesaria para capturar la escala a la que ocurren cambios acelerados en la estructura y funcionamiento de la ciudad (p.e. la urbanización de ciertas regiones se intensifica, o los patrones de tráfico vehicular se modifican). **En los últimos años, el desarrollo de sensores de contaminantes de bajo costo y la miniaturización de los componentes necesarios en un sistema de medición, han generado un gran interés por construir e instalar pequeños dispositivos de monitoreo de gases y material particulado, que pueden ser replicados en redes densas en las ciudades, a una fracción del costo de los equipos tradicionales de gama alta.**

Es en este contexto que reportamos aquí la construcción, instalación y funcionamiento de un conjunto de tales dispositivos de medición que llamamos **sistemas de microsensores (S μ S)**. Los S μ S descritos se emplean en el monitoreo de la fracción molar (término que de aquí en adelante será simplificado a concentración) de CO₂ en la atmósfera superficial de la Ciudad de México, por ser el GEI de origen antropogénico de mayor importancia. Describimos la estructura de los prototipos, algunos de los retos encontrados durante la caracterización inicial de su funcionamiento y las soluciones propuestas, los procedimientos de evaluación de su desempeño, y los primeros resultados de su operación en distintos puntos de la Ciudad de México.

1.2 Antecedentes

Diversos estudios previos dan cuenta de la factibilidad del desarrollo, instalación y operación de S μ S de costo bajo a moderado aplicados al monitoreo de CO₂ atmosférico, con resultados variados pero alentadores:

En la ciudad de Oakland, California, el proyecto BEACO₂N (Berkeley Environmental Air-quality & CO₂ Network) comprende una red densa de 50 nodos (26 iniciales) de medición de CO₂, además de otros parámetros de calidad del aire a nivel de superficie (Shusterman et al., 2016; Kim et al., 2018). Los nodos se encuentran separados entre sí por distancias máximas de 2 km. La red BEACO₂N es capaz de mostrar diferencias significativas en el ciclo diurno de la concentración de CO₂ de nodo a nodo, que no son capturadas de manera adecuada por los modelos de transporte atmosférico (Shusterman et al., 2016). A pesar del uso de sensores comerciales de costo relativamente bajo, la red consigue una reducción considerable del error estimado de las mediciones. En conjunto, la incertidumbre del promedio semanal de la concentración de CO₂ de los sensores BEACO₂N para el área urbana es <2%, una mejora sustancial comparada con el 10-25% de incertidumbre estimada en otras ciudades para redes de ~10 sensores de alta calidad, pero cuya mayor separación espacial resulta en un mayor error asociado al modelo de transporte atmosférico entre sensores (Shusterman et al., 2016).

En Suiza, la red *Carbosense* consiste en una combinación de siete instrumentos de referencia, 20 dispositivos de costo intermedio (similares a los descritos en este documento) y 300 microsensores de bajo costo distribuidos en todo el país, con énfasis especial en las ciudades de Zurich y Ticino (Müller et al., 2020). El estudio encuentra que los sensores de menor costo son inestables, requieren calibraciones frecuentes contra los analizadores comerciales de referencia y correcciones de la deriva instrumental. No obstante, son capaces de capturar las variaciones locales de la concentración de CO₂ en una amplia variedad de condiciones ambientales, si bien no resultan útiles en la detección de tendencias de largo plazo y otras variaciones de menor escala (Müller et al., 2020).

Arzoumanian et al. (2019) caracterizaron el desempeño de sensores de idéntico fabricante y modelo a los reportados aquí, con un objetivo de repetibilidad de las mediciones a largo plazo de

1 ppm, en el área de París, Francia. Considerando este objetivo de estabilidad estricto, los resultados indican que estos sensores deben ser calibrados a intervalos regulares (6 semanas) usando gases de calibración para contrarrestar la deriva instrumental, o bien co-localizarse con el instrumento de referencia durante una semana aproximadamente, cada 45 días, sin necesidad de gases. Empleando esta estrategia, los errores residuales no rebasan el objetivo establecido, demostrando la factibilidad de estos sensores en la construcción de redes urbanas de monitoreo de CO₂.

El desarrollo tecnológico que reportamos aquí corresponde a prototipos de S_μS con un diseño básico similar al descrito por Arzoumanian et al. (2019). **Su construcción inicial formó parte del proyecto MERCI-CO₂ (Mexico City's Regional Carbon Impacts)** con apoyo de Conacyt (290589) y la Agencia de Investigación Francesa (ANR). Se trata de una colaboración entre la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), el *Laboratoire des Sciences de Climat et de l'Environnement* (LSCE) y el *Institut Pierre Simon Laplace* en Francia. LSCE es la sede del Centro Temático de la Atmósfera de la red europea ICOS (Integrated Carbon Observation System), un programa internacional de medición y análisis de los flujos y concentraciones de GEI en la atmósfera global, a nivel ecosistémico. El objetivo del proyecto MERCI-CO₂ fue obtener estimaciones de las emisiones de CO₂ en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), que fuesen independientes del inventario de emisiones desarrollado por el gobierno de la Ciudad de México, y que por lo tanto pudiesen servir como confirmación o punto de comparación al mismo. El proyecto contempló el desarrollo e instalación de una red de S_μS para capturar los gradientes de concentración de CO₂ dentro y fuera del ámbito urbano, y su interpretación con ayuda de un modelo de transporte atmosférico de mesoescala (García Reynoso et al., 2018). Hasta la instalación de los dispositivos reportados aquí, no existió una red de monitoreo de la concentración de CO₂ de superficie que haya operado de manera continua en la ZMVM. Esta megalópolis está constituida por las 16 alcaldías de la Ciudad de México, 59 municipios conurbados del Estado de México y el municipio de Tizayuca, Hidalgo, y está habitada por 21 millones de personas. El último inventario reporta que en 2018 se emitieron en esta región 75 Mton de GEI en conjunto, cuantificados como dióxido de carbono equivalente (CO₂eq) (SEDEMA, 2021). La estimación de las concentraciones de contaminantes en la atmósfera urbana de la ZMVM está dificultada por la existencia de una topografía compleja, que impide la dispersión efectiva de los contaminantes, la influencia de fuentes de emisión fuera de los confines de la urbe, y una gran heterogeneidad de las fuentes emisoras.

1.3 Objetivos

- Desarrollar un sistema de microsensors de costo intermedio para el monitoreo de la concentración de CO₂ en la atmósfera superficial de la ZMVM.
- Demostrar la factibilidad de detectar gradientes en la concentración de CO₂ en la ZMVM a través de la implementación de una red de monitoreo con sistemas de microsensors.

- Obtener estimaciones de emisiones de CO₂ en la ZMVM, independientes a las reportadas en los inventarios gubernamentales de emisiones, que sirvan como comparativo e instrumento de validación de los mismos.

2 ESTRUCTURA Y FUNCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO

En 2019 y 2020 se construyeron un total de 13 S μ S para monitoreo continuo y automatizado de la concentración de CO₂ atmosférico, cuyo funcionamiento puede ser controlado de manera remota, vía internet. Por haber formado parte del proyecto MERCI-CO₂, el nombre designado a estos S μ S fue ‘**mercis**’ e identificados individualmente con un número (p.e. merci01, merci07, etc.). Contenidos en un gabinete o contenedor de plástico, cada S μ S merci comprende cuatro módulos o subsistemas (Fig. 1, tabla 1):

- el **neumático o de gestión de la muestra de aire;**
- los **sensores de CO₂, temperatura y humedad relativa** del aire;
- la **unidad de adquisición, procesamiento, almacenamiento de datos, control electrónico y de comunicaciones;**
- la **alimentación eléctrica.**

En la siguiente descripción, los números entre corchetes corresponden a los elementos mostrados en la figura 1.

El subsistema **neumático** tiene por función llevar la muestra de aire hasta los sensores. Los componentes principales son una electroválvula solenoide, una bomba miniatura de succión/presión y un medidor de flujo, así como las mangueras y tubos que los conectan entre sí. La muestra de aire que llega al merci puede provenir de la atmósfera o de un tanque presurizado [1] que contiene una concentración conocida de CO₂ balance aire para propósitos de calibración o seguimiento, y que está equipado con un regulador de flujo bajo de dos etapas [2]. En el exterior del merci el aire es conducido a través de tubo semirrígido Synflex® [3], hecho de aluminio recubierto de polietileno de alta densidad, y en el interior a través de mangueras flexibles de Tygon®. Cuando la muestra proviene de la atmósfera, el extremo del tubo abierto a la misma se encuentra protegido de la lluvia y los insectos por una guarda fabricada con tubo de PVC y malla mosquitero [4]. En la entrada de la muestra de aire al gabinete se encuentra un filtro en línea de acero inoxidable [5], cuyo poro nominal puede ir de 0.5 a 2 μ m. Una vez en el interior del gabinete, la bomba [7] aspira la muestra de aire, conduciéndola hasta la electroválvula solenoide de tres vías [6], que controla la fuente de la cual proviene la muestra (i.e. aire atmosférico o el tanque de mezcla). Pasando a través de la bomba, el aire es empujado a través del flujómetro [8] y de ahí sucesivamente a los sensores de temperatura/humedad relativa, y de CO₂. El flujómetro tiene por función reportar a la unidad de control el volumen de aire circulante. Finalmente, la muestra sale

del sensor de CO₂ por difusión; un ventilador [9] situado frente a la zona de expulsión del aire contribuye a renovar el aire al interior del gabinete y a regular la temperatura del sistema.

El segundo subsistema comprende los sensores de las características de la muestra. El **sensor de temperatura** es del tipo brecha de banda (band gap) y el **sensor de humedad relativa** es de tipo capacitivo. El conjunto se encuentra miniaturizado en un chip que fue colocado en el brazo inferior de una 'T' de acero inoxidable [10], de modo que la corriente de aire pasa por encima del chip sin ser interferida por el mismo. Finalmente, el aire llega al **sensor de CO₂** [11], que utiliza la técnica espectroscópica de absorción no dispersiva en el infrarrojo (NDIR por sus siglas en inglés), basada en la absorción de luz infrarroja en las bandas de longitud de onda específica del CO₂, y en la Ley de Beer Lambert. El sensor se compone de una fuente de radiación infrarroja, una cavidad con un camino óptico de aproximadamente 1 m de longitud, y un detector infrarrojo con un filtro óptico que permite el paso de la radiación exclusivamente en las longitudes de onda en que es atenuada por las moléculas de CO₂. El sensor de CO₂ incluye un sensor de presión, cuyos registros se utilizan en un algoritmo que calcula parámetros de corrección de la concentración de CO₂ en aire por variaciones en la presión ambiental. En ausencia de un tubo de expulsión, el aire escapa del sensor de CO₂ de manera difusa.

El subsistema de **adquisición, procesamiento y almacenamiento de datos** consta de una **placa de interfaz desarrollada por EOLab Technology** [12] para la red ICOS. La placa EOLab controla el funcionamiento y adquisición de datos por parte de los componentes de los subsistemas neumático y de sensores. Cuenta con puertos de conexión para la electroválvula, la bomba, los sensores de temperatura/humedad relativa y CO₂, a través de los cuales entrega corriente a estos dispositivos y recibe datos de los mismos. La placa EOLab se conecta a **una microcomputadora de placa única Raspberry Pi4 (RPi4)** [13] a través de un chip UART USB a TTL [14]. La RPi4 B está equipada con un puerto micro-HDMI que permite conectar un monitor o pantalla, un puerto Ethernet, y cuatro puertos USB para otros periféricos, uno de los cuales está conectado al sensor de CO₂ para recepción de datos. En conjunto, estos puertos constituyen la interfaz de comunicación del sistema. También cuenta con una memoria micro-SD [15] para el almacenamiento de datos. El sistema operativo de la RPi4 es Raspbian; el acceso a la interfaz del usuario ocurre a través de una aplicación comercial de escritorio remoto. El software de control y el de visualización, escritos en lenguaje Python 2.7 y alojados en la RPi4, permiten desplegar en tiempo real el registro de datos, acceder a los parámetros del sistema y verificar su correcto funcionamiento. Los datos se almacenan localmente en la tarjeta micro-SD y adicionalmente son enviados diariamente a servidores en línea para su almacenamiento permanente.

El sistema se alimenta por una sola **fuentes de energía** [16] que convierte la corriente alterna en corriente directa de 12 V, y que la entrega a un regulador de subida [17], cuya función es elevar el voltaje para permitir la carga del banco de seis baterías ion-Li (12 V, 550 mAh) [18]. La carga de las baterías es controlada por un microcontrolador de corriente (14.8 V, 30 A) [19]; tanto las baterías como su microcontrolador se encuentran alojados en un gabinete plástico más pequeño

adosado al principal. La corriente entregada por las baterías (12 V) pasa por tres reguladores de bajada. El primero [20] alimenta directamente al sensor de CO₂ con un voltaje de 12 V, y paralelamente al ventilador; un segundo regulador de bajada, idéntico al primero y conectado a éste [21], alimenta con 12 V a la placa EOLab, y ésta a la electroválvula, la bomba y el flujómetro con igual voltaje. Del primer regulador de voltaje de bajada se alimenta un tercer regulador [22] que entrega 5 V a la placa EOLab, la cual alimenta con igual tensión tanto al sensor de temperatura/humedad relativa como a la microcomputadora RPi4 a través de los pines de entrada/salida de propósito general (GPIO) de ésta. En caso de interrupción de la corriente alterna, el banco de baterías proporciona respaldo hasta por 6 horas de operación continua.

El gabinete plástico que sirve de contenedor al merci proporciona protección contra polvo y agua, al tiempo que contribuye a amortiguar los cambios de temperatura en el prototipo. Los componentes fueron organizados en el interior del gabinete en dos pisos, separados entre sí por una lámina de acrílico transparente. La lámina, a la cual están adosados los componentes del piso superior, se encuentra fijada al gabinete por medio de bisagras en uno de sus costados, de modo que es posible acceder a los componentes de la porción inferior girando el conjunto superior alrededor de estas bisagras. El gabinete cuenta con puertos para el ingreso de la muestra proveniente del tanque de seguimiento y de la atmósfera, éste último protegido por el filtro en línea. Además, el contenedor fue equipado con un interruptor exterior, una conexión para cable de corriente alterna, una rejilla de ventilación anexa al ventilador situado frente al sensor de CO₂, y conectores exteriores para cable Ethernet, cable HDMI y cables USB.

En el **Anexo A** pueden apreciarse las características exteriores de los mercis, el arreglo de los componentes en el interior del gabinete y el mecanismo de separación de los pisos.

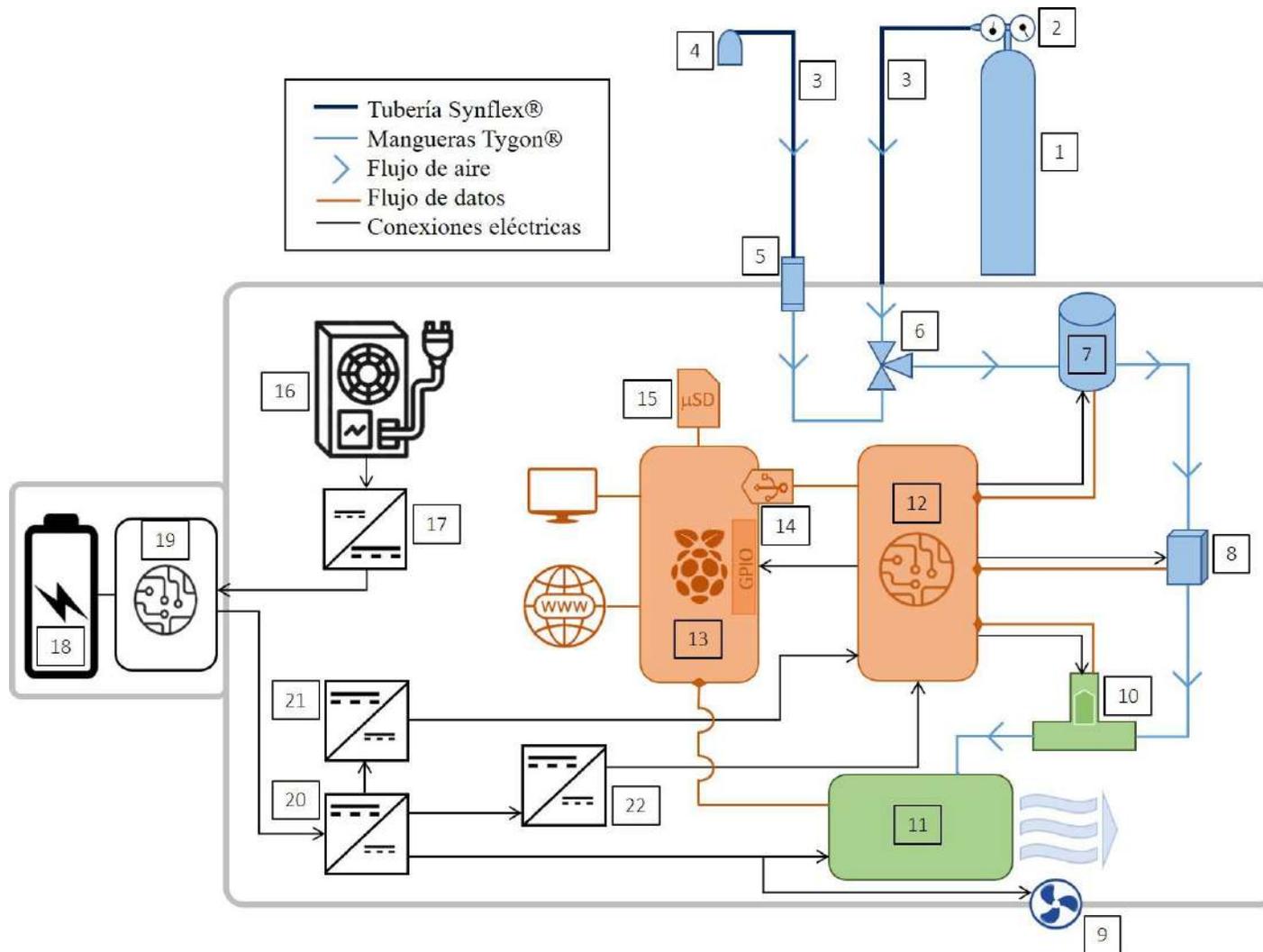


Fig. 1. Componentes de los S μ S ‘merci’ para el monitoreo de CO₂. En azul se ilustra el subsistema neumático, en verde los sensores, en naranja el subsistema de adquisición, procesamiento y almacenamiento de datos, y en negro la alimentación eléctrica. La descripción correspondiente a los números puede consultarse en el apartado 2.

Tabla 1. Componentes de los SμS ‘merci’ para el monitoreo de CO₂. ND = No disponible

Subsistema	Componente	Fabricante	Modelo(s)	Características
Neumático	Bomba miniatura de succión/presión	Thomas	1410VD/1.5/E/DC (1410-0304)	12 V, 3.2 l/min flujo máx., motor de escobillas
	Electroválvula solenoide	SMC Pneumatics	VDW250-6G-1-M5	12 V, latón, válvula NC
	Flujómetro	SMC Pneumatics	PFMV530-1	12 V, rango 0 l/min – 3 l/min
	Tubería externa	Eaton	Synflex 1300	¼ in OD
	Tubería interna	Saint Gobain	Tygon	4 mm ID × 6 mm OD
	Tanque de seguimiento	Luxfer	29 l, 40 l	Aluminio aleación 6061, válvula Ceodeux de latón, conexión CGA 590
	Regulador de presión	Scott (Air Liquide)	Y12114B590	2 etapas, conexión CGA 590, presión máxima de entrega 1 bar
	Filtro de ingreso	Swagelok	SS-4F-2, SS-4FWS-05	Acero inoxidable, conexiones de compresión, ¼ in OD
	Ventilador	(genérico)	612 NGMI	12 V
Sensores	Temperatura y humedad relativa	Sensirion	SHT75, SHT85	2.15 V – 5.5 V voltaje mín/máx, protocolo I ² C
	‘T’ para sensor de temperatura/hum relativa	Swagelok	SS-400-3	Acero inoxidable, conexiones de compresión, ¼ in OD
	CO ₂	SenseAir AB	HPP3	NDIR, 12 V, rango de medición 0 – 1000 ppm, camino óptico 0.96 m
	- Sensor de presión integrado a sensor de CO ₂	ST Microelectronics	LPS331AP	Rango de medición 263 hPa – 1277 hPa
Adquisición, procesamiento y almacenamiento de datos	Placa de interfaz	EOLab Technology	CO2-BOX Fille R1	
	Dispositivo UART	(genérico)	CP2102	USB 2.0 tipo A a TTL, 3.3 V máx
	Microcomputadora	Raspberry Pi foundation	Raspberry Pi4 B 4G	SO Raspbian, 4 GB Memoria RAM
	- Tarjeta microSD	SanDisk	SanDisk Extreme	32 GB, Clase 10, HC

Subsistema	Componente	Fabricante	Modelo(s)	Características
Alimentación eléctrica	Fuente de poder	Eagle	(ND)	CA – CD, conmutada, 12 V 30 A
	Baterías ion-Li	Samsung	18650	3.7 V, 550 mAh
	Controlador de carga de baterías	(genérico)	CF-4S30A-A	14.8 V, 30 A, 4 celdas
	Regulador de aumento de voltaje	Tenstar Robot	(ND)	CD – CD, 10 A, 250 W V _{in} = 8.5 V – 48 V V _{out} = 10 V – 50 V
	Regulador de reducción de voltaje	(genérico)	XL 4016	CD – CD, 9 A, 300 W V _{in} = 5 V – 40 V V _{out} = 1.2 V – 35 V
	Regulador de reducción de voltaje	(genérico)	XL 4015	CD – CD, 5 A, 50 W V _{in} = 5 V – 32 V V _{out} = 0.8 V – 30 V
	Gabinete principal	(genérico)	(ND)	Plástico, 30 cm × 22 cm × 16 cm
	Gabinete de baterías	(genérico)	(ND)	Plástico, 12 cm × 8 cm × 5 cm

3 CARACTERIZACIÓN DE LOS PROTOTIPOS

Con objeto de caracterizar el desempeño de los mercis, éstos fueron co-localizados con un monitor de referencia Picarro G2401 (Picarro Inc., Santa Clara, CA, EUA), un Espectrómetro de Extinción Anular en Cavidad (CRDS por sus siglas en inglés). Este equipo opera como parte de la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (RUOA, www.ruoa.unam.mx) en la plataforma instrumental del Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, en la Ciudad Universitaria de la UNAM. El monitor se encuentra equipado con un sistema de calibración mensual que emplea tres estándares gaseosos de concentración de CO₂ conocida, proporcionados por el Laboratorio de Monitoreo Global (GML por sus siglas en inglés) de la agencia norteamericana NOAA, trazables a la escala WMO CO₂ X2007 (González del Castillo et al., 2022).

A continuación, se describen con detalle tres tópicos que durante el desarrollo y caracterización de los mercis tuvieron implicaciones importantes: 1) el impacto de la presión barométrica, 2) los procedimientos de calibración contra el equipo de referencia, y 3) el tratamiento de la deriva instrumental utilizando un tanque de seguimiento. Se mencionan además brevemente otros retos o aspectos de importancia encontrados. No se muestran los resultados para todos los mercis construidos, sólo se ilustran los puntos destacables para algunos dispositivos. Las figuras y tablas completas se documentan en la tesis de Porrás-Reza (en preparación).

3.1 Impacto de la presión barométrica

Durante la construcción de los mercis en la CDMX se realizaron numerosos cambios y mejoras al sistema de alimentación eléctrica de los S_μS descritos por Arzoumanian et al. (2019), sin embargo, el subsistema neumático no fue alterado. La selección inicial y las primeras pruebas de desempeño de los componentes fueron realizadas por personal del LSCE e ICOS, a la altitud y de París, Francia (28 – 131 m snm), prácticamente a nivel de mar, en contraste con la altitud de la CDMX (~2,280 m snm); entre ambos existe una diferencia de presión atmosférica de ~200 hPa. La construcción y operación de los mercis a una presión considerablemente menor tuvo las siguientes consecuencias:

- **La bomba miniatura de succión/presión debe ejercer mayor trabajo contra una atmósfera a menor presión para suministrar un flujo de aire adecuado (~1 lpm) a los sensores,** particularmente al sensor de CO₂, cuya celda de medición opera en modo presurizado para evitar el impacto de un contraflujo de aire del interior del gabinete en la operación.

Las primeras pruebas con nueve mercis armados en la CDMX indicaron que en cinco de ellos las bombas trabajan permanente a su mayor velocidad (Fig. 2), lo que reduce su vida útil. Dos mercis más mostraron periodos en que la bomba trabaja por debajo de su límite por algunos días y dos sistemas más permanecieron a un nivel de trabajo aceptable de manera indefinida, indicando que la capacidad de las bombas individuales es también variable. La menor capacidad de las bombas

debida a la altitud se ve agravada por taponamiento de los filtros de entrada y otros pequeños situados en las aperturas del flujómetro, debido a la gran cantidad de material particulado en la atmósfera de la CDMX, que puede acumularse rápidamente en los filtros.

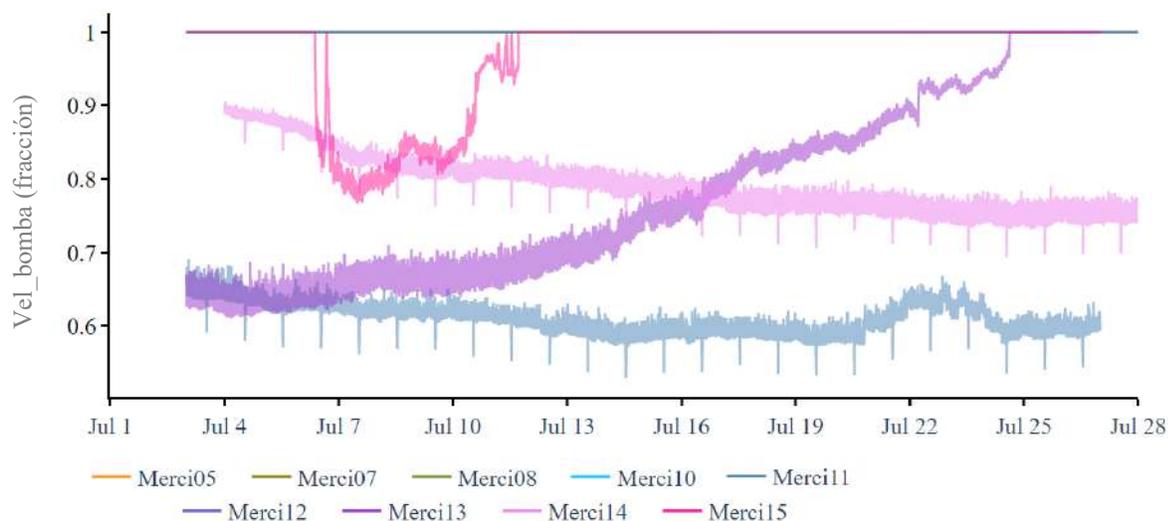


Fig. 2. Fracción de la velocidad máxima de operación de la bomba de succión/presión.

Conforme las bombas actuales vayan quedando fuera de uso, serán reemplazadas por unas de mayor caudal máximo; se considera además emplear dos bombas de menor costo de forma alterna en cada merci, de modo que los ciclos de trabajo continuo de cada una de ellas sean de menor duración.

- **El sensor de CO₂ muestra una marcada dependencia de la presión atmosférica a la que opera.**

Los sensores NDIR operan bajo el principio teórico de la relación entre la transmisión de la luz a cierta longitud de onda y el número de moléculas de gas capaces de absorber en dicha longitud de onda (ley de Beer Lambert). Este número de moléculas en el volumen muestral depende directamente de la presión del mismo, de modo que aún pequeñas variaciones de presión ambiental en el volumen de muestra pueden tener un impacto importante en la medición de la concentración del gas.

El sensor de CO₂ HPP3 integra un sensor de presión y un algoritmo de compensación que en teoría abarcan ampliamente la presión atmosférica típica de la CDMX (Arzoumanian et al., 2019; Gaynullin et al., 2016), sin embargo, **los valores crudos de concentración reportados por los sensores de CO₂ muestran un *offset* considerable y variable de -195 ± 95 ppm (promedio \pm SD; $n = 7$ dispositivos) con respecto de los valores registrados por el instrumento de referencia. Esta diferencia es específica de cada sensor y salvo en los casos en que ocurre una deriva instrumental significativa (ver más adelante), es relativamente constante en el tiempo (Tabla**

2). Las pruebas iniciales con sensores idénticos realizadas en París, arrojaron también un *offset* significativo, si bien de mucha menor magnitud, atribuible a diferencias en la presión ambiental (L. Olivier, comunicación personal; Arzoumanian et al. 2019).

Tabla 2. Diferencia entre la concentración promedio de CO₂ reportada por los mercis con respecto del instrumento de referencia.

S μ S	Línea base promedio (ppm)	Promedio \pm SD de la diferencia con línea base de Picarro G2401 (ppm)
merci06	120	-314.77 \pm 11.08
merci07	300	-110.18 \pm 5.42
merci11	290	-129.98 \pm 3.97
merci12	290	-132.48 \pm 4.54
merci13	270	-146.36 \pm 4.94
merci14	90	-338.25 \pm 9.13
merci15	225	-195.49 \pm 8.43

El *offset* encontrado en la línea base es corregible con una calibración adecuada (ver sección 3.2), aunque su magnitud amerita una exploración más profunda de las causas, que pudiese redundar incluso en un perfeccionamiento del algoritmo de compensación integrado al software del fabricante, especialmente para condiciones de operación similares a las de la CDMX.

3.2 Procedimientos de calibración

Se presentan los resultados de dos procedimientos de calibración de los prototipos merci: 1) una regresión simple de los valores de concentración de CO₂ contra los reportados por el analizador de referencia Picarro G2401, y 2) una regresión multivariada que incorpora el efecto de la presión atmosférica, la temperatura y la humedad relativa de la muestra de aire.

Antes de su paso por el analizador Picarro, el aire atmosférico atraviesa un secador de Nafion que extrae el vapor de agua presente en la muestra, de modo que los valores reportados por el Picarro corresponden a la fracción molar seca de CO₂ en aire. Los prototipos merci no están equipados con un secador, por lo que se aplica una corrección a los valores de concentración en aire húmedo o ‘crudos’ (CO_{2raw}). La fórmula de corrección (Eq.1) estima la fracción molar seca (CO_{2dry}) a partir del cociente de mezcla de vapor de agua (H₂O_{ppm}) obtenido de los valores de humedad relativa del aire reportados por el sensor SHT75/SHT85. De aquí en adelante, ‘concentración de CO₂’ se refiere a la fracción molar seca de este gas en la muestra de aire.

$$CO_{2dry} = \frac{CO_{2raw}}{1 - 0.01 \frac{H_2O_{ppm}}{10000}}$$

Eq. 1

- **Calibración por regresión lineal simple**

La figura 3 muestra un conjunto de gráficas de dispersión del promedio de la concentración de CO₂ por minuto reportada por algunos de los dispositivos merci contra la concentración reportada por el analizador Picarro. Es posible observar la magnitud del *offset* (o desplazamiento de la línea base, b en la ecuación 2) mencionado anteriormente, así como la especificidad de la regresión para cada dispositivo.

A partir de estas relaciones, la corrección de la concentración reportada por cada merci por medio de la regresión lineal con los datos del Picarro tiene por ecuación general:

$$CO_2_{\text{corregido}} = m * CO_2_{\text{merci}} + b \quad \text{Eq. 2}$$

Donde b representa el desplazamiento de la línea de base, y m la pendiente de la recta que indica la proporción del incremento de CO₂ corregido por cada unidad de CO₂ reportada por los merci.

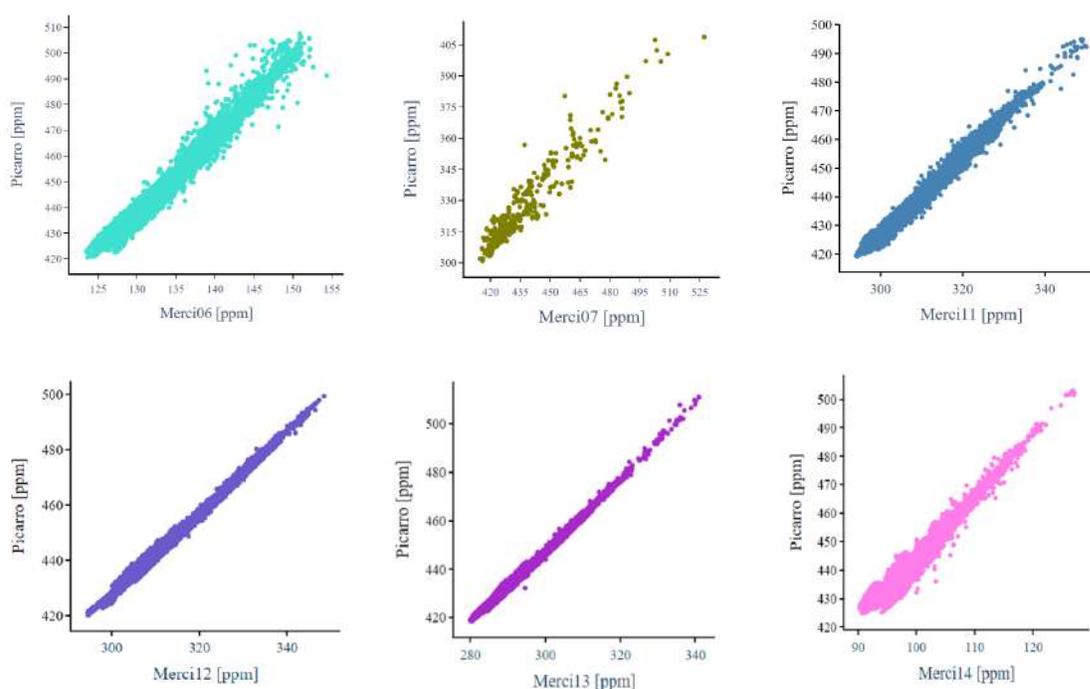


Fig. 3. Correlaciones entre el promedio minutil de la concentración de CO₂ sin corregir reportada por varios de los dispositivos merci, y la registrada por el analizador de referencia Picarro durante el periodo de co-localización en la plataforma instrumental del ICAYCC.

Un caso particular lo constituye el dispositivo merci15, cuya nube de puntos en el gráfico de dispersión no colapsa en una línea única, sino que puede ser descrita por varias ecuaciones de regresión lineal para diferentes intervalos de temperatura del sensor de CO₂ (Fig. 4). Esto confirma

la especificidad de la caracterización de la respuesta y de la calibración para cada dispositivo, así como la marcada dependencia de la temperatura interna en algunos de ellos.

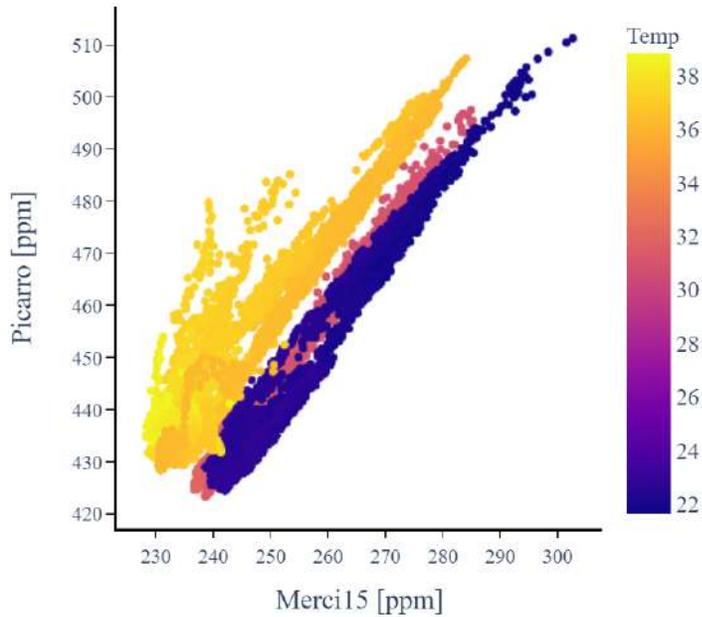


Fig. 4. Relación entre el promedio de minuto de la concentración de CO₂ sin corregir reportada por merc15 y la registrada por el analizador de referencia Picarro. El color de los puntos indica la temperatura interna del sensor de CO₂ HPP3.

● Calibración por regresión lineal múltiple

Una calibración por regresión lineal múltiple incorpora la influencia de uno o más factores ambientales para obtener la concentración corregida de CO₂. En el caso de los dispositivos merci se consideraron la temperatura (T), presión atmosférica (p) y humedad relativa (RH) de la muestra (Eq. 3):

$$CO_{2Corregido} = a_1 CO_{2merci} + a_2 T + a_3 P + a_4 RH + b \quad \text{Eq. 3}$$

Donde a_i es el coeficiente para cada predictor y b es la ordenada al origen o desplazamiento de la línea base.

En la tabla 3 se presentan los estadísticos descriptivos de las ecuaciones de calibración por regresión simple y múltiple. Se muestran la raíz del error cuadrático medio (RMSE), el coeficiente de determinación R^2 , y la probabilidad del estadístico F de significancia del modelo de regresión lineal (indicado únicamente como * para $p < 0.05$ y ** para una $p < 0.01$). Todos los modelos de regresión lineal, tanto simples como multivariados, fueron altamente significativos (**). Para el caso de la regresión múltiple, todos los coeficientes a_i tuvieron una influencia significativa a altamente significativa en la regresión lineal múltiple para cada dispositivo.

Se efectuó adicionalmente una prueba de Shapiro-Wilks de normalidad de los residuales para ambos modelos. En ningún caso se cumple la normalidad; encontramos que esto ocurre principalmente por la incapacidad de los modelos de ajustarse a las concentraciones más altas de CO₂ (particularmente para merci07 y merci15); además se identificó que la temperatura sigue teniendo cierto grado de influencia sobre la variabilidad de los residuos.

Tabla 3. Estadísticos de los modelos de regresión lineal simple y múltiple de la concentración de CO₂ de los S μ S merci calibrados con el analizador de referencia Picarro.

S μ S	Regresión simple			Regresión múltiple			Reducción en RMSE _{mult-simple} (%)
	RMSE	R ²	Valor-p	RMSE	R ²	Valor-p	
merci06	2.21	0.98	**	1.91	0.99	**	13.6
merci07	2.34	0.92	**	2.12	0.94	**	9.4
merci11	1.84	0.98	**	1.35	0.99	**	26.6
merci12	1.77	0.99	**	1.18	0.99	**	33.3
merci13	2.30	0.97	**	1.39	0.99	**	39.6
merci14	3.99	0.94	**	2.36	0.98	**	40.9
merci15	5.95	0.76	**	3.38	0.86	**	43.2

** p < 0.01

Como puede observarse en cada caso, los modelos de regresión lineal múltiple se caracterizan por un coeficiente R² ligeramente mayor. **Más importante, el RMSE registra disminuciones notables que van de 9 a 43% del valor obtenido con la regresión simple.** Es decir, el modelo más complejo y que considera las condiciones atmosféricas de la muestra, captura una proporción ligeramente mayor de la variabilidad observada en las concentraciones de CO₂ reportadas por los dispositivos merci, reduce la incertidumbre de las estimaciones, y confirma la dependencia de la respuesta de los mercis a dichas condiciones ambientales.

Todos los RMSE, interpretados aquí como el error de medición de los prototipos merci, se encuentran por debajo de 4 ppm (<1%) para el caso de las regresiones múltiples, y es considerablemente menor que la amplitud de la oscilación diaria de la concentración de CO₂ registrada en la plataforma instrumental del ICAyCC con el analizador Picarro, y que en promedio alcanza 35 ppm/día.

La figura 5 muestra series de tiempo selectas para tres dispositivos en varios periodos de calibración. Se ilustra la serie de datos crudos original, las series calibradas mediante regresión lineal simple y múltiple, así como las concentraciones medidas por el analizador Picarro.

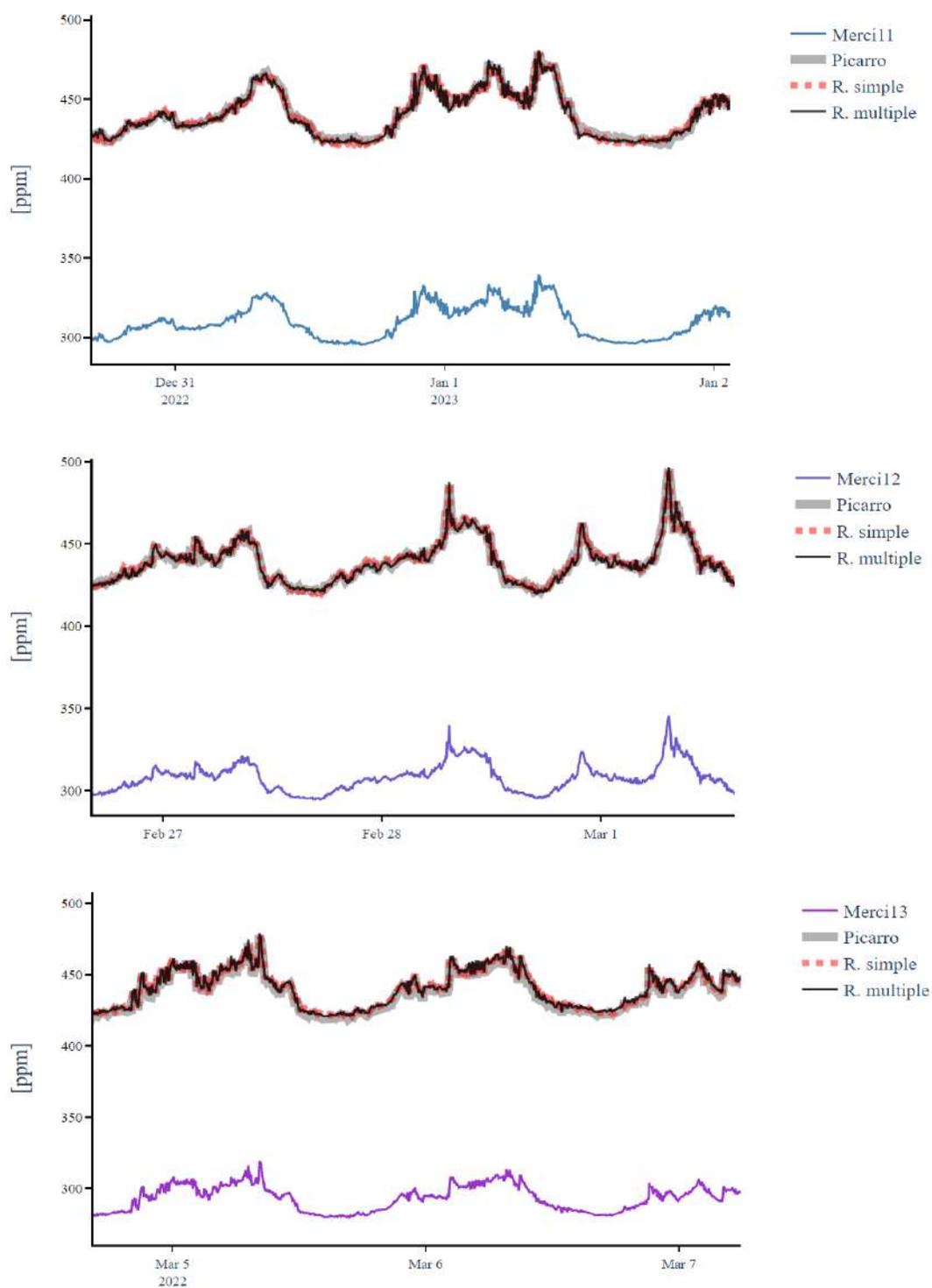


Fig. 5. Concentraciones de CO₂ de minuto para los dispositivos merci11, merci12 y merci13 durante diversos periodos de calibración contra el analizador Picarro.

3.3 Deriva instrumental: uso de un tanque de seguimiento (*target*)

Algunos de los dispositivos merci muestran un cambio gradual en la línea base de concentración de CO₂ reportado que no se corresponde con una variación estacional o de largo plazo, es decir, una deriva instrumental. En particular el sensor merci07 muestra una deriva considerable; su línea base se incrementó de 300 ppm a 1200 ppm en un año.

Para contrarrestar el problema de deriva detectable en algunos de los mercis, se estableció el uso de un tanque de seguimiento (llamado '*target*' en los documentos de la red ICOS) de concentración conocida de CO₂ balance aire. La mezcla se hace pasar por el merci cada día durante 3 minutos, a la misma hora, y la diferencia entre la concentración conocida y la registrada por el merci es utilizada para corregir el resto de los datos. Los valores intermedios entre dos mediciones consecutivas del tanque de seguimiento se corrigen por medio de una interpolación.

Las gráficas de la figura 6 ilustran dos criterios necesarios para seleccionar los valores de concentración de CO₂ del tanque de seguimiento que posteriormente se promediarán y se emplearán en la corrección de la deriva: 1) se utilizan sólo los valores correspondientes a la porción central de la meseta del periodo de medición, es decir, el periodo en que el aire del tanque ha sustituido por completo el aire atmosférico remanente en la línea, y 2) la muestra de aire es completamente seca.

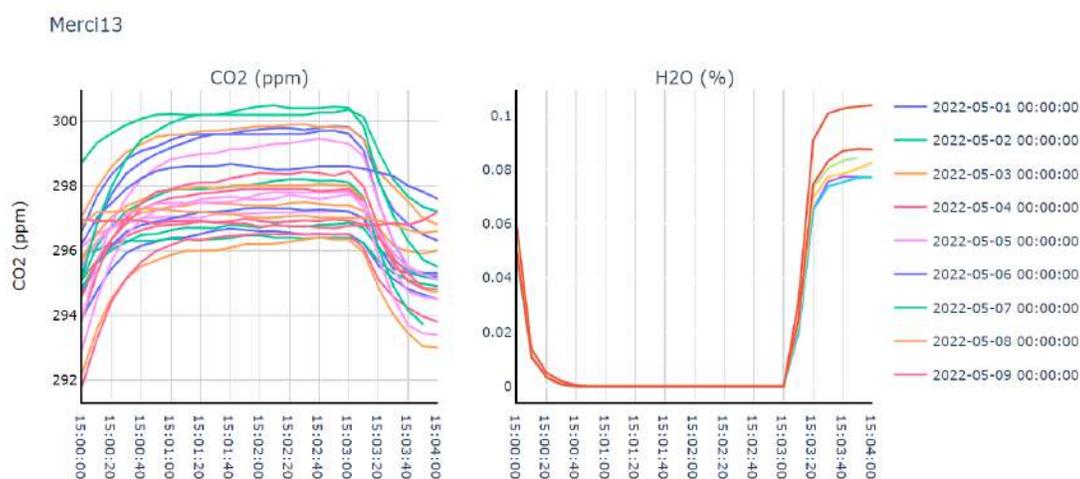


Fig. 6. Concentración de CO₂ del tanque de seguimiento durante días consecutivos de medición en el merci13 (izq.) y porcentaje de vapor de agua en la misma muestra de aire

Los valores de concentración de CO₂ del tanque de seguimiento deben corregirse con las mismas ecuaciones de calibración encontradas para cada dispositivo merci antes de ser utilizadas en la corrección de la deriva. En la figura 7 se muestra la línea de tiempo de las mediciones del tanque

de seguimiento asociado al merci13. Este prototipo en particular mostró una deriva importante; en color beige se muestran los datos crudos de la medición de seguimiento, en gris los mismos valores ajustados con la corrección lineal simple, y en morado los corregidos con la regresión lineal múltiple. La línea punteada señala la concentración conocida de la mezcla de seguimiento. En aproximadamente un año el merci13 ha tenido una deriva de ~50 ppm, que es mucho mayor a la tendencia de incremento anual a nivel mundial para el CO₂.

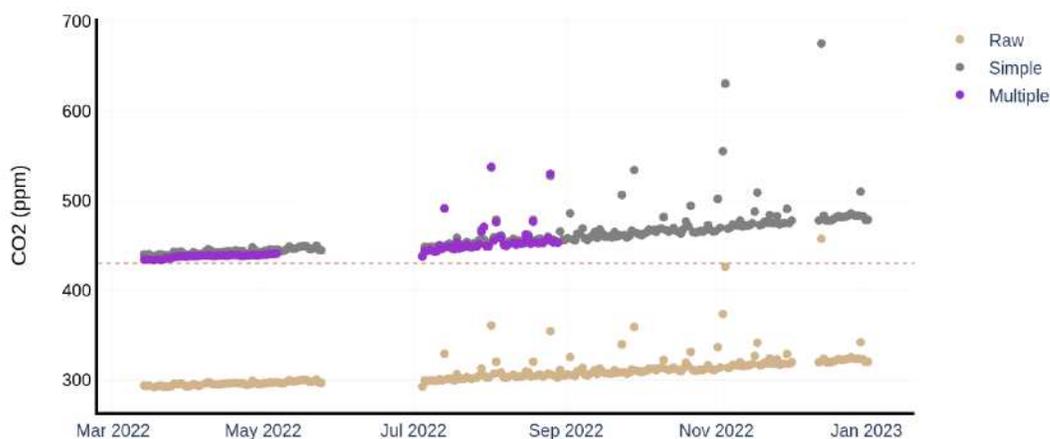


Fig. 7. Concentración de CO₂ del tanque de seguimiento reportada por merci13 durante un año. La diferencia entre la concentración conocida y la medida sirve para efectuar una corrección diaria de la deriva instrumental

3.4 Otros retos

- **Saturación de la memoria de almacenamiento.** Se observó que si la memoria de los instrumentos comienza a saturarse, la escritura de los archivos de datos queda incompleta (Fig. 8). El reinicio del prototipo y la eliminación de datos que ya hayan sido enviados a servidores para su almacenamiento permanente soluciona este inconveniente.
- **Restricción del flujo de aire exterior y retorno de aire del interior de la caseta de medición.** Durante la instalación inicial en el ICAYCC, los mercis fueron conectados a un manifold y a un extractor de aire exterior comunes que impusieron una limitación significativa al flujo de aire que llegaba hasta el sensor de CO₂. El caudal de aire exterior resultaba insuficiente para renovar la muestra en el sensor, y producía un contraflujo de aire de la caseta de medición. En estas condiciones, las series de tiempo de la concentración de CO₂ mostraron un aserramiento asociado a los cambios de temperatura debidos al encendido intermitente del aire acondicionado en la caseta (Fig. 9). La solución consistió en un extractor de aire más potente que suministra

el flujo necesario al conjunto de mercis. El aserramiento de las series de tiempo no ocurre en las instalaciones individuales sin extractor ni manifold.

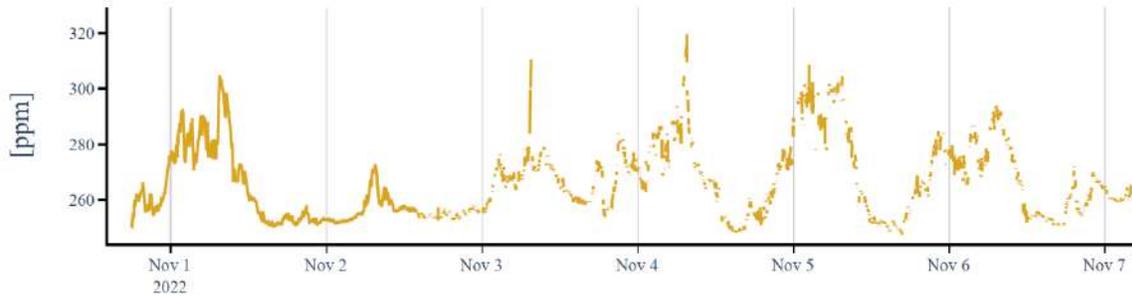


Fig. 8. Serie de tiempo con datos faltantes por problemas de memoria.

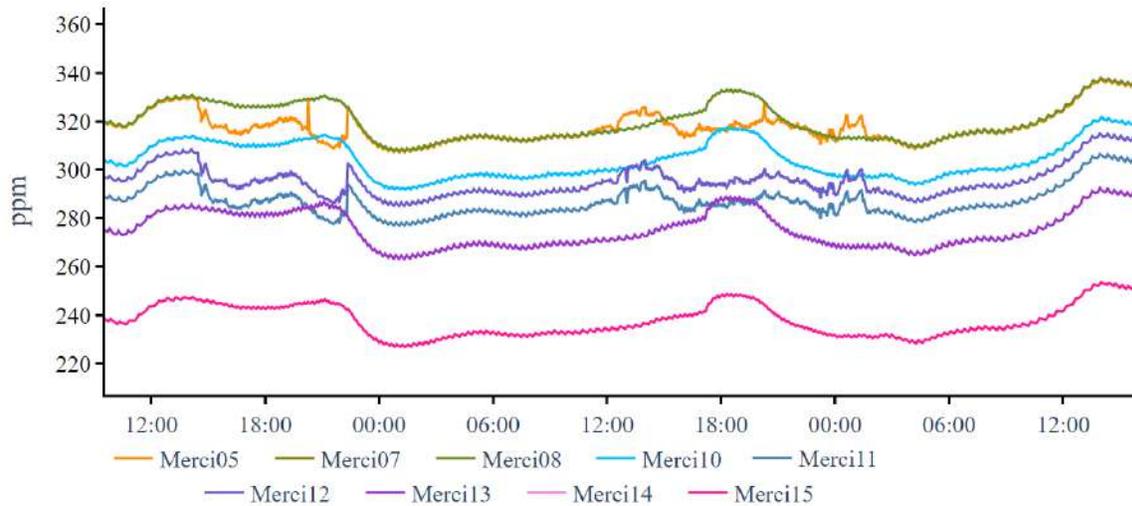


Fig. 9. Serie de tiempo de los mercis afectados por un contraflujo de aire de la caseta.

- **Desfase en los relojes.** Se observó una falta de sincronía entre los relojes de las RPi4 de los mercis, que utilizan un protocolo NTP, y el analizador Picarro, cuyo reloj mostró retrasos hasta de 5 minutos. La falta de sincronía de los relojes se corrigió por medio de una correlación cruzada que identifica los minutos de desfase entre ambas series de tiempo encontrando el coeficiente de determinación R^2 máximo para cada día. En la figura 10 se muestra que antes de

la corrección, R^2 es máximo a los 5 minutos, y después de realizar la corrección del desfase la correlación máxima se encuentra en el minuto 0, es decir, no existe desfase.

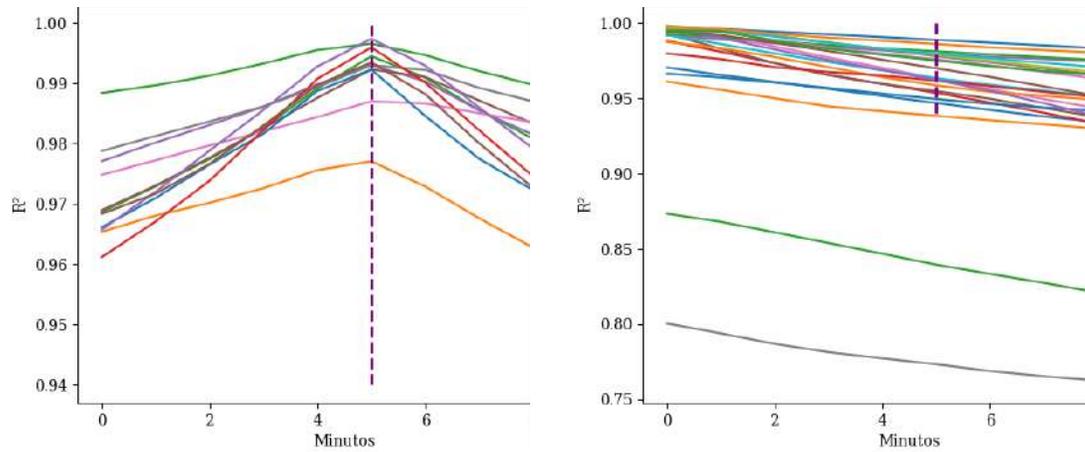


Fig. 10. Correlación máxima entre las series de tiempo producidas por los mercis y el analizador Picarro antes (izq.) y después (der.) de la corrección del desfase de los relojes.

4 IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED DE MONITOREO

Tras un periodo prolongado de calibración contra el analizador Picarro, entre mayo y noviembre de 2022 se instalaron cinco unidades merci en distintos puntos de la ZMVM (Fig. 11). Cada dispositivo fue ubicado en una caseta de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) de la CDMX, equipado con un tanque de seguimiento cuya concentración fue previamente caracterizada utilizando el analizador Picarro.

Actualmente se trabaja en una comparación preliminar entre las concentraciones de CO₂ medidas por los merci en cada sitio y las producidas por el modelo de mesoescala WRF (García-Reynoso et al. 2018), el cual está alimentado con los datos del inventario de emisiones de 2018 para la ZMVM (Gobierno de México, SEMARNAT e INECC, 2022). Aunque los primeros resultados son alentadores, las diferencias con los productos del modelo son considerables en varios sitios (Figs. 12 y 13) y deben ser analizadas a fondo e interpretadas en el contexto de las características del modelo, las deficiencias en su desempeño que son conocidas para las zonas de topografía más compleja de la urbe, y aún el proceso acelerado de urbanización que ha ocurrido entre 2018 y 2023 para uno de los sitios de muestreo (Tecámac, Estado de México).

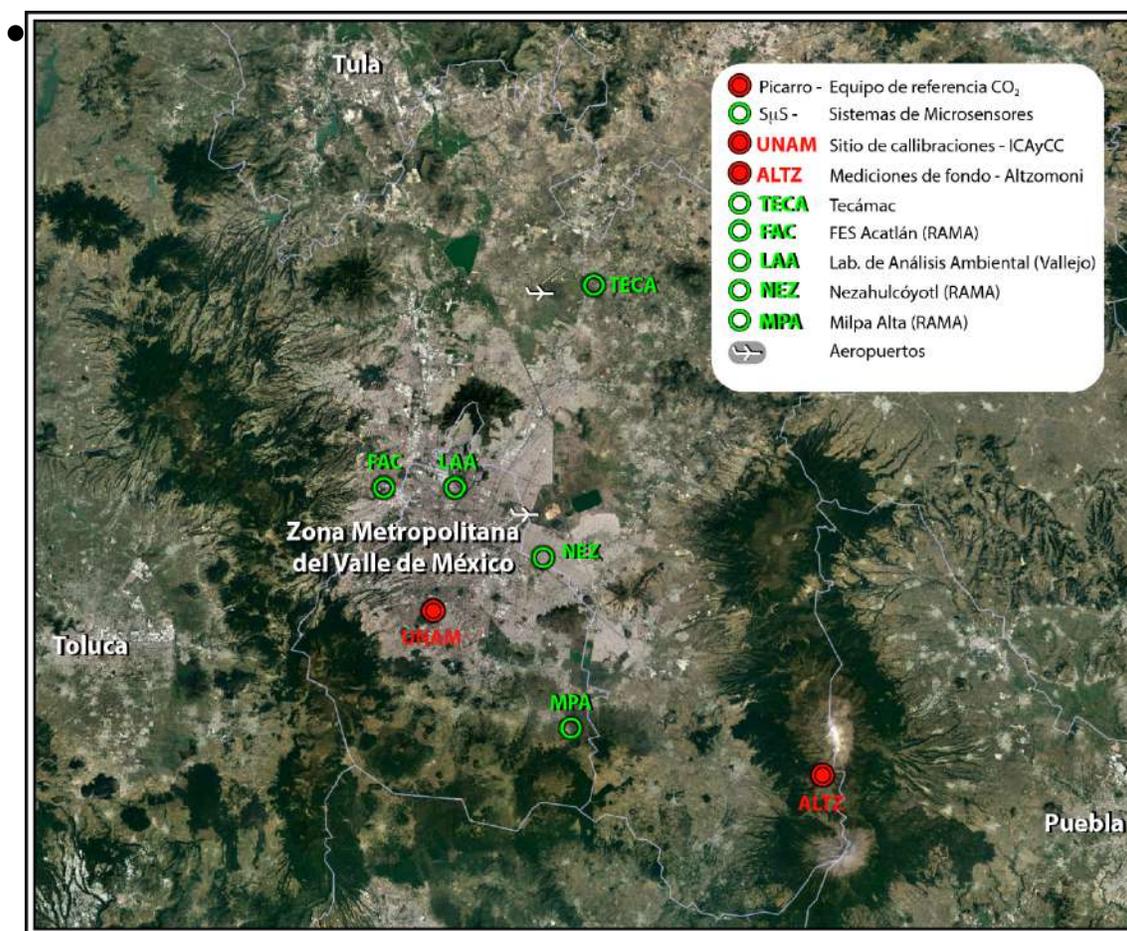


Fig. 11. Mapa de ubicaciones de la red de dispositivos merci en la ZMVM

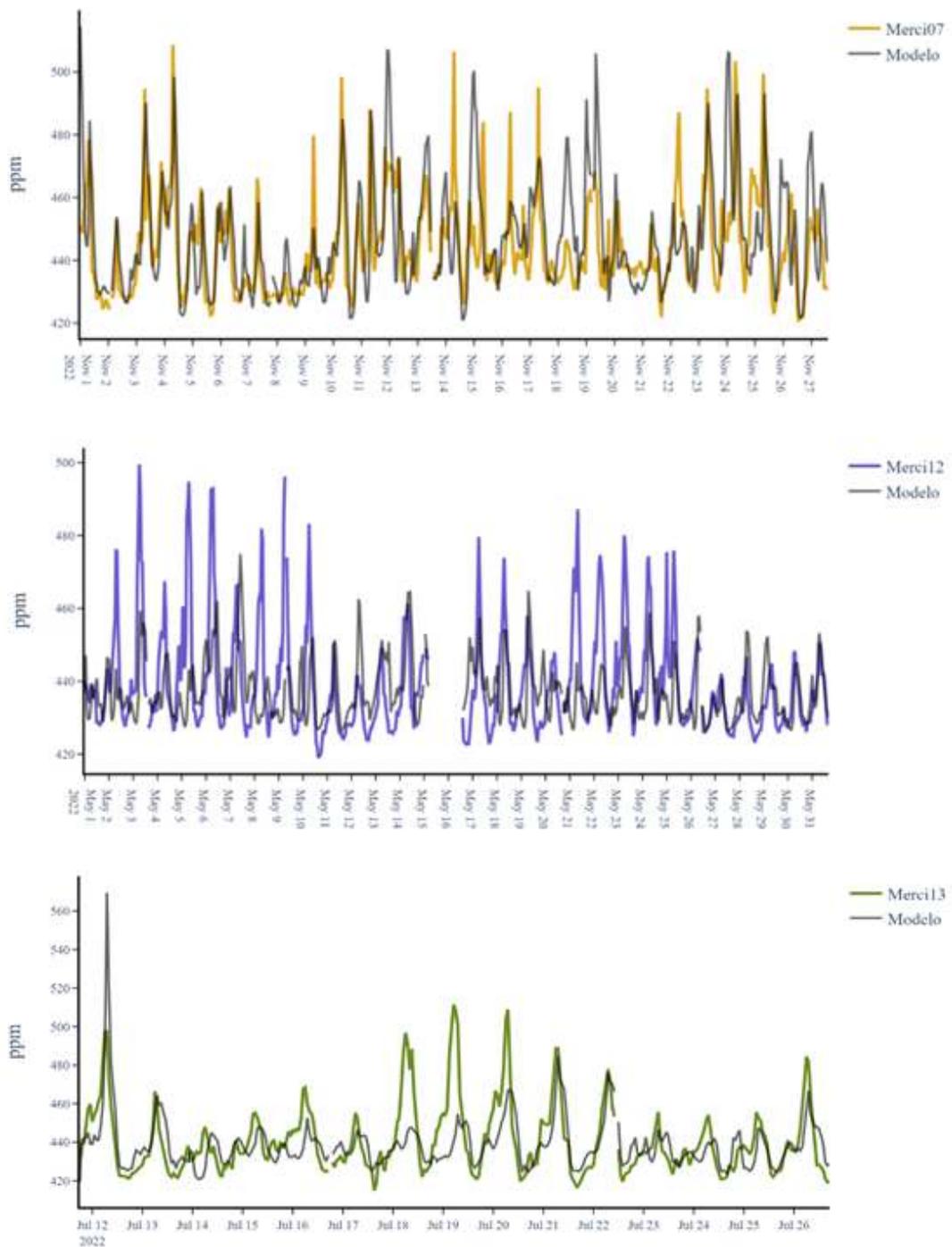


Fig. 12. Series temporales de la concentración de CO₂ medida *in situ* en los sitios FES Acatlán (FAC), Ciudad Universitaria (UNAM) y Vallejo (LLA) por los dispositivos merci07, merci12 y merci13 respectivamente, y los resultados del modelo de mesoescala para dichas localidades en los mismos periodos.

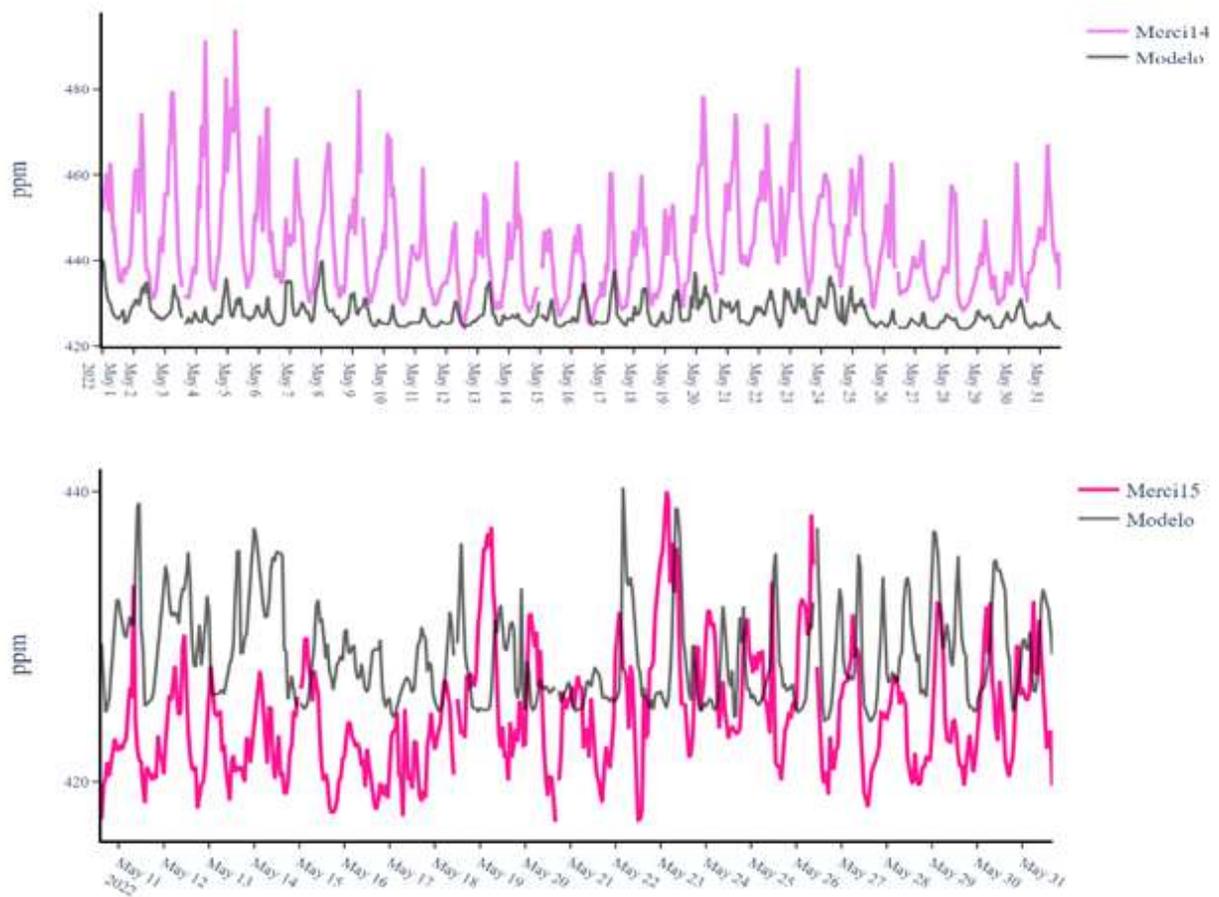


Fig. 13. Series temporales de la concentración de CO₂ medida *in situ* en los sitios Tecámac, Estado de México (TECA) y Milpa Alta, CDMX (MPA) por los dispositivos merci14 y merci15 respectivamente, y los resultados del modelo de mesoescala para dichas localidades en los mismos periodos.

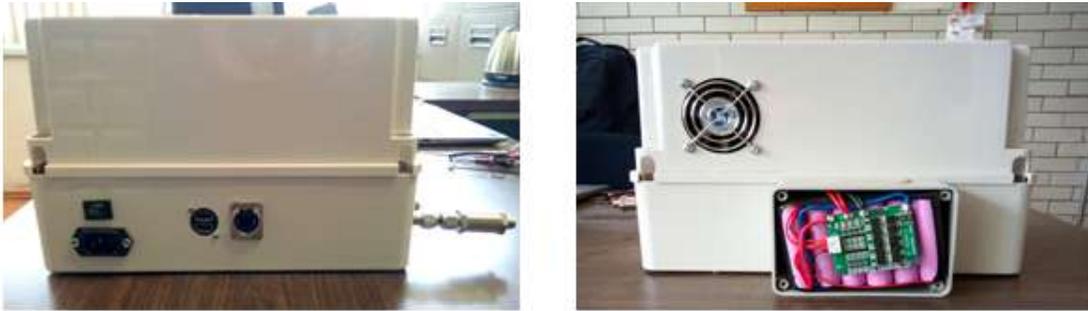
5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Queda demostrada la factibilidad del uso de S_μS de costo moderado para el monitoreo de la concentración de CO₂ superficial en un ambiente urbano como la ZMVM.
- El diseño y construcción de S_μS de tipo activo (en que la muestra es transportada desde el exterior y forzada a través del sensor por un sistema neumático de succión/presión) requiere consideraciones cuidadosas de las condiciones ambientales de presión atmosférica, temperatura, humedad relativa y carga de contaminantes atmosféricos en que operará.
- La caracterización del desempeño de S_μS de tipo activo es específica para cada dispositivo construido, puede consumir un tiempo prolongado, y debe considerar aspectos como la carga de trabajo de la bomba de succión/presión, el flujo o caudal alcanzado y su evolución en el tiempo por obstrucción de filtros, y la durabilidad de sensores ambientales de temperatura y humedad relativa en las condiciones atmosféricas de operación.
- Existe una dependencia marcada de los valores de concentración de CO₂ producidos por estos S_μS y condiciones de presión ambiental y de temperatura interna de los propios sensores, por lo que tales respuestas deben ser cuidadosamente caracterizadas antes de la instalación definitiva en campo.
- Una calibración de los S_μS descritos a través de una regresión lineal múltiple que incorpore los efectos de variaciones ambientales de presión, temperatura y humedad relativa del aire produce valores de concentración de CO₂ muy similares (<1%) a los producidos por un analizador de referencia de alto costo.
- La deriva instrumental es un artefacto de medición esperable en estos S_μS y su corrección debe ser anticipada. En este estudio se demuestra que el empleo de un tanque de seguimiento con este propósito es una alternativa viable al uso de tanques de calibración en el sitio de instalación final.
- Los S_μS de tipo activo descritos en este estudio, una vez caracterizados adecuadamente, pueden emplearse para medir el CO₂ en la atmósfera urbana con errores menores a la variabilidad diurna
- Es importante destacar que a pesar de que el uso de S_μS como los que aquí se describen representan un ahorro económico significativo en cuanto al equipo de inversión inicial, se tiene que considerar el considerable esfuerzo y tiempo dedicado de personal especializado en el desarrollo, pruebas, caracterizaciones, visitas de mantenimiento, reparaciones, y análisis de los datos involucrados en este tipo de proyectos.

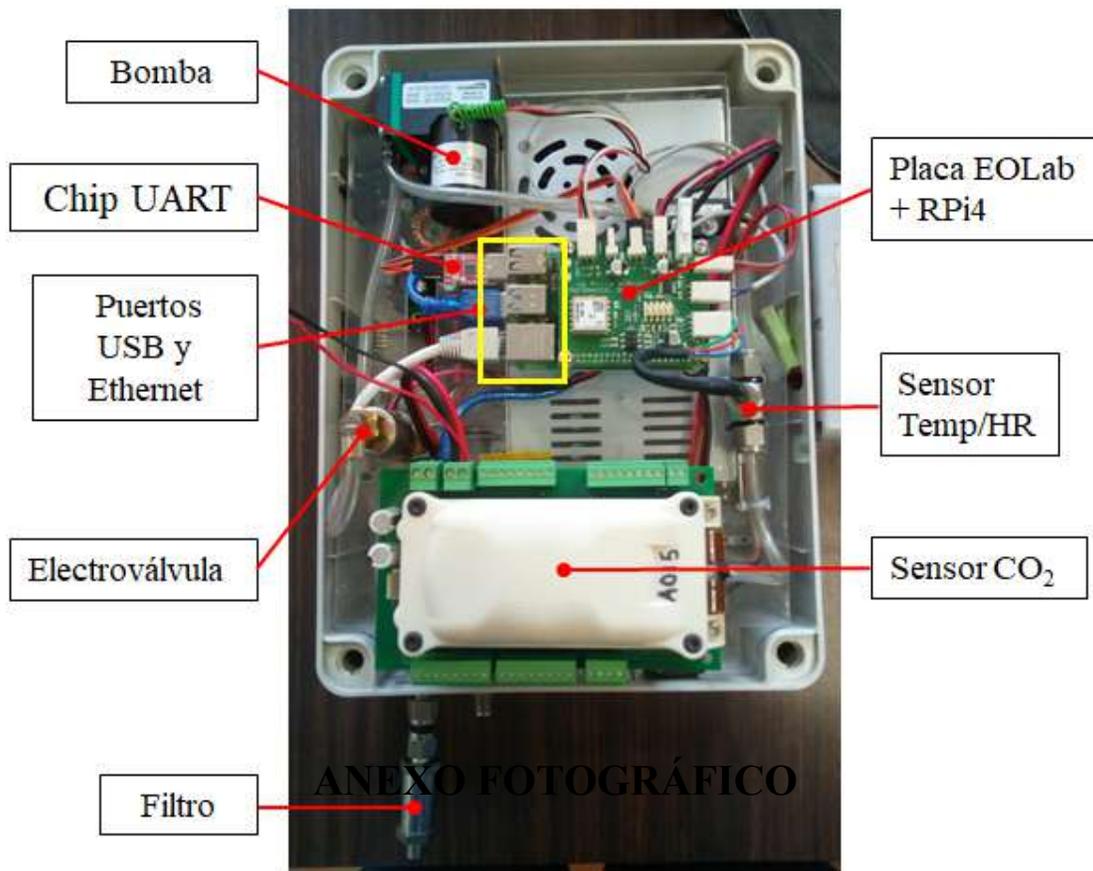
6 REFERENCIAS

- Arzoumanian, E., F.R. Vogel, A. Bastos, B. Gaynullin, O. Laurent, M. Ramonet, P. Ciais. 2019. Characterization of a commercial lower-cost medium-precision non-dispersive infrared sensor for atmospheric CO₂ monitoring in urban areas, *Atmos. Meas. Tech.*, 12, 2665–2677. <http://doi.org/10.5194/amt-12-2665-2019>.
- García-Reynoso, J.A., B.E. Mar-Morales, L.G. Ruiz-Suárez. 2018. Modelo de Distribución Espacial, Temporal y de Especiación del inventario de emisiones de México (año base 2008) para su uso en modelización de calidad del aire (DiETE). *Rev. Int. Contam. Ambie.* 34, 635-649. <http://doi.org/10.20937/RICA.2018.34.04.07>
- Gobierno de México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales e Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. 2022. México: Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero, 1990-2019. Ciudad de México, México.
- González del Castillo, E., N. Taquet, A. Bezanilla, W. Stremme, M. Ramonet, O. Laurent, Y. Xu, M. Delmotte, M. Grutter. 2022. CO₂ variability in the Mexico City región from *in situ* measurements at an urban and a background site. *Atmósfera*, 35, 377-393. <http://doi.org/10.20937/ATM.52956>
- Kim, J., A.A. Shusterman, K.J. Lieschke, C. Newman, R.C. Cohen. 2018. The BERkeley Atmospheric CO₂ Observation Network: field calibration and evaluation of low-cost air quality sensors, *Atmos. Meas. Tech.*, 11, 1937–1946. <http://doi.org/10.5194/amt-11-1937-2018>.
- Müller, M., P. Graf, J. Meyer, A. Pentina, D. Brunner, F. Perez-Cruz, C. Hüglin, L. Emmenegger. 2020. Integration and calibration of non-dispersive infrared (NDIR) CO₂ low-cost sensors and their operation in a sensor network covering Switzerland. *Atmos. Meas. Tech.*, 13, 3815–3834. <http://doi.org/10.5194/amt-13-3815-2020>.
- Porrás-Reza, S. 2023. Evaluación de inventarios de CO₂ en la Ciudad de México. Tesis de Maestría. Posgrado en Ciencias de la Tierra. UNAM. En preparación.
- SEDEMA, 2021. Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México 2018. Dirección General de Calidad del Aire. Dirección de Proyectos de Calidad del Aire. Ciudad de México, México.
- Shusterman, A.A., V.E. Teige, A.J. Turner, C. Newman, R.C. Cohen. 2016. The BERkeley Atmospheric CO₂ Observation Network: initial evaluation. *Atmos. Chem. Phys.* 16, 13449–13463. <http://doi.org/10.5194/acp-16-13449-2016>.
- Lwasa, S., K.C. Seto, X. Bai, H. Blanco, K.R. Gurney, Ş. Kilkış, O. Lucon, J. Murakami, J. Pan, A. Sharifi, Y. Yamagata, 2022: Urban systems and other settlements. En IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)). Cambridge University Press, Cambridge, Inglaterra y Nueva York, EU. <http://doi.org/10.1017/9781009157926.010>

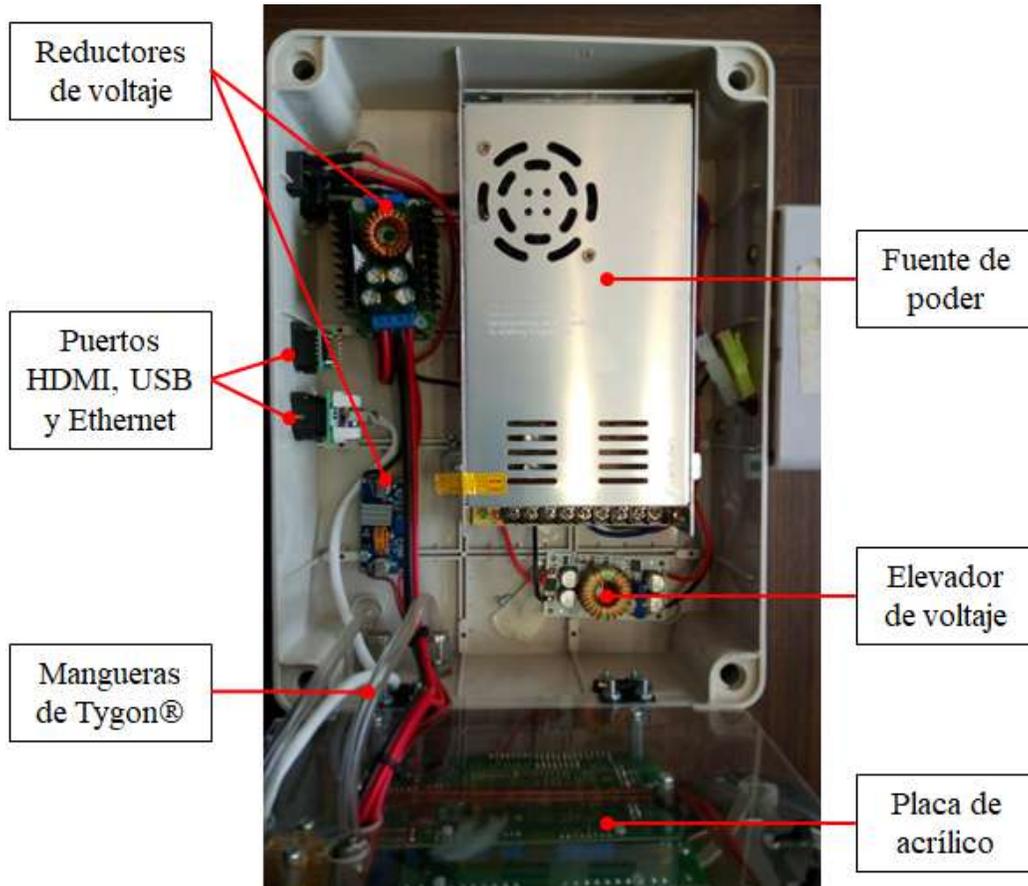
ANEXO FOTOGRÁFICO



Vistas laterales del gabinete, mostrando en una cara los puertos de conexión y el interruptor (izq.), y del lado opuesto el gabinete de baterías adosado al principal y la rejilla de ventilación (der.). En el gabinete pequeño se muestran las baterías y su controlador.



Vista superior del merci abierto, mostrando la distribución de los componentes del piso superior, fijos a la placa acrílica. La microcomputadora RPi4 se encuentra debajo de la placa EOLab; pueden apreciarse los puertos de su interfaz de comunicación en el recuadro amarillo.



Vista superior del mercí abierto, mostrando la distribución de los componentes del piso inferior, con la placa de acrílico girada sobre su costado