



## **Informe Parcial**

# **Observatorio Mexicano del Clima y la Composición Atmosférica (Proyecto OMECCA)**

Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático  
Universidad Nacional Autónoma de México

29 de junio del 2022

## Tabla de Contenidos

1. Introducción	3
2. Análisis detallado del diseño conceptual y las especificaciones para la puesta en marcha del OMECCA	7
2.1. Características técnicas de la estación e instrumentación	7
2.2. Determinación de la densidad de columnas atmosféricas	8
a. CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , CO y H <sub>2</sub> O	8
b. NO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , HCHO y SO <sub>2</sub>	12
2.3. Concentración de contaminantes y gases de efecto invernadero en superficie	13
a. Gases contaminantes y de efecto invernadero	13
b. Partículas atmosféricas	15
c. Depósito atmosférico	19
d. Carbonilos atmosféricos	
2.4. Flujos de carbono, agua y energía en vegetación y suelo	21
a. Técnica de covarianza turbulenta y balance de energía	21
b. Meteorología	24
c. Propiedades del suelo	24
d. Indicadores ópticos de fenología vegetal y temperatura de superficie	28
3. Grupo técnico de trabajo	30
4. Avances en la adquisición del equipo instrumental, accesorios y contenedores	30
a. Contenedor marítimo modificado	30
b. Espectrómetro infrarrojo Bruker IFS 125/HR	31
c. Analizador Picarro G2401	31
d. Estación meteorológica	
5. Consideraciones adicionales	32
a. Selección del sitio	32
b. Participación internacional	33
c. Sigüientes pasos	33
Bibliografía	34

## 1. Introducción

Contar con información confiable y completa sobre la evolución de las concentraciones de contaminantes atmosféricos y los gases de efecto invernadero (GEI) en la República Mexicana, es de suma importancia para poder evaluar la efectividad de las políticas públicas en materia del combate a la contaminación atmosférica y el cambio climático.

Para mejorar el conocimiento del papel que estos gases contaminantes juegan en la atmósfera, la salud de los ecosistemas y el clima, es necesario estudiar los niveles de concentración y su variabilidad para así conocer las fuentes y las actividades responsables de su aumento. Las observaciones satelitales actuales, y sobre todo las que se tienen planeadas en los próximos años sobre órbitas geoestacionarias, nos permitirán determinar la concentración de bióxido de carbono en la atmósfera, los intercambios principales de carbono entre la vegetación y la atmósfera, evaluar su variabilidad en el tiempo e identificar fuentes extraordinarias de emisión en tiempo casi real, así como observar y cuantificar los niveles de concentración de ozono y otros contaminantes atmosféricos en superficie sobre el territorio nacional. La validación de los productos satelitales a través de sistemas sofisticados de medición en superficie es un componente indispensable para poder reducir las incertidumbres y usar los datos satelitales con mayor confianza.

En este proyecto multiinstitucional, se pondrá en marcha una estación terrena de validación de datos satelitales, contribuyendo de manera activa a la misión de los satélites GeoCarb (Geostationary Carbon Cycle Observatory) y TEMPO (Tropospheric Emissions: Monitoring of Pollution) de la NASA, entre otras. GeoCarb observará gran parte del continente americano de manera continua desde una órbita geoestacionaria, y podrá registrar diariamente la distribución espacial de importantes parámetros atmosféricos como son el bióxido de carbono, el metano, el monóxido de carbono, la fluorescencia inducida por el sol (SIF por sus siglas en inglés; un indicador de la intensidad de la captura de bióxido de carbono por parte de la vegetación a través de la fotosíntesis), y otros parámetros. Por su parte, TEMPO barrerá latitudinalmente casi la totalidad del subcontinente norteamericano, registrando cada hora durante el día las concentraciones troposféricas de ozono, dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre, formaldehído y glioxal, logrando un monitoreo sin precedentes de la contaminación atmosférica.

El objetivo primordial del Observatorio Mexicano del Clima y la Composición Atmosférica (OMECCA), es proveer de parámetros de las propiedades y la actividad del suelo y la vegetación, la composición química del depósito atmosférico, y las concentraciones de gases y partículas en el aire ambiente, de manera que sirvan como punto de referencia en los cálculos para la determinación de estos mismos parámetros desde el espacio.

La combinación de mediciones de flujos y concentraciones realizadas desde la superficie con aquellas provistas por percepción remota, redundará en una mayor aplicabilidad de los productos satelitales. Éstos presentan, naturalmente, limitaciones para resolver el impacto que las condiciones ambientales y las perturbaciones tienen en los procesos ecosistémicos a escalas espaciales y temporales finas. Por su parte, la utilidad de las mediciones de superficie está también naturalmente constreñida al área fuente de las emisiones y sumideros muestreada directamente, por lo que su extrapolación a nivel regional presenta un alto nivel de incertidumbre. El monitoreo simultáneo desde el espacio y la superficie, en un contexto espacial común, permitirá estudiar más eficazmente el efecto de procesos naturales y antropogénicos en el aumento de la temperatura, el transporte de contaminantes, las sequías o el fuego tienen sobre la productividad y la salud del ecosistema.

A manera de ilustración, la figura 1 muestra un diagrama conceptual simple de la disposición de los instrumentos de medida en el OMECCA, y de la simultaneidad de las mediciones superficiales y satelitales en espacio y tiempo. El observatorio constará básicamente de un contenedor que alojará un conjunto de instrumentos de medición en columna y superficie y cuya descripción se detalla más adelante, y una torre metálica arriostrada donde se ubicarán equipos que miden por encima del dosel vegetal. Otras observaciones se efectuarán a nivel de suelo, en el área de influencia de la torre.

A continuación se listan algunas de las variables (seguidas por sus siglas en inglés) que serán medidas por el OMECCA y que tienen una relación directa con productos reportados por algunos instrumentos satelitales:

- Los gases  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{HCHO}$  y  $\text{SO}_2$ , entre otros, medidos como densidad de columna vertical o concentración integrada a lo largo de la columna atmosférica.
- La densidad óptica del aerosol (AOD), como proxy de la cantidad de partículas suspendidas en el aire, así como de la concentración de partículas finas medidas en superficie. La concentración de partículas finas ( $\text{PM}_{2.5}$ ) en superficie será medida adicionalmente para complementar y mejorar la interpretación de la observación satelital de AOD.
- Los principales flujos de carbono entre la superficie vegetal y la atmósfera: el intercambio neto del ecosistema (NEE) y su descomposición en productividad primaria bruta (GPP) y respiración del ecosistema ( $R_{\text{eco}}$ ), es decir la cantidad total de  $\text{CO}_2$  secuestrado y liberado hacia la atmósfera por la actividad conjunta de la vegetación y el suelo, respectivamente.

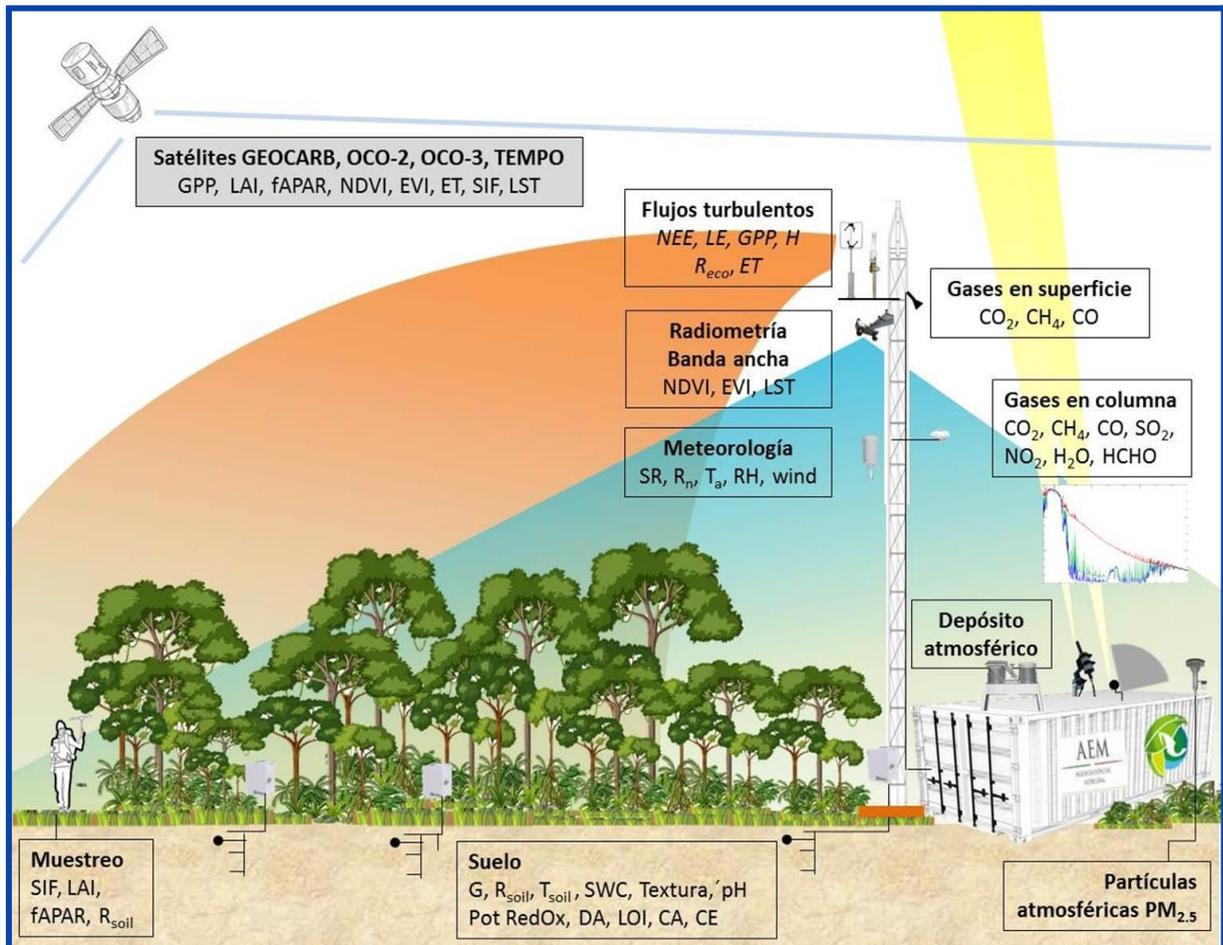
- La cantidad de agua que retorna a la atmósfera por evapotranspiración (ET); la suma del agua evaporada desde la superficie y la transpirada por la vegetación, así como los flujos de energía cercanamente asociados a este proceso: el calor sensible (H) y el calor latente de evaporación (LE).
- Varios indicadores ópticos de verdor de la vegetación: índice diferencial normalizado de vegetación NDVI (de banda ancha), el índice mejorado de vegetación EVI (de banda ancha), índice de área foliar LAI, fracción de radiación fotosintéticamente activa fAPAR. Todos ellos constituyen proxies de la productividad primaria del sitio, es decir de su capacidad de convertir carbono atmosférico en biomasa y son parámetros esenciales en los modelos globales del ciclo del carbono.
- La temperatura radiométrica de la superficie terrestre (LST), cuyas variaciones se relacionan directamente con cambios en la extensión, distribución y estructura de la cobertura vegetal.
- La fluorescencia inducida por el sol (SIF), un parámetro directamente relacionado con la respuesta fisiológica de la fotosíntesis a un evento de estrés (sequía, fuego, daño por contaminantes o plagas) y por lo tanto relacionado con la productividad primaria.

Otras medidas como el flujo de calor sensible del suelo (G) y el flujo de CO<sub>2</sub> del suelo hacia la atmósfera (R<sub>soil</sub>), no tienen una relación directa con productos satelitales, pero resultan indispensables para la interpretación del monitoreo de superficie y la validación de parámetros satelitales. Lo mismo ocurre con la meteorología del sitio y las variables fisicoquímicas y de estructura del suelo (temperatura T<sub>soil</sub>, contenido de humedad SWC, textura, pH, potencial RedOx, densidad aparente DA, materia orgánica LOI, carbono almacenado CA y conductividad eléctrica CE).

Además del uso directo de la información generada con fines de validar y contribuir al mejoramiento de los productos satelitales, algunas de las preguntas científicas que se quieren abordar incluyen:

- ¿Cuál es la magnitud de los principales intercambios de carbono entre la vegetación y la atmósfera en un bosque tropical subperennifolio del sureste de México?
- ¿Cuánto y de qué manera impactan los contaminantes (gases, partículas, metales pesados, etc.) transportados de otras regiones a este ecosistema?
- ¿Cuáles son los compuestos contaminantes que llegan a esta zona y cómo afectan los suelos y la vegetación? ¿Qué tanto son afectados los ciclos naturales de carbono, el agua y la energía?
- ¿Qué papel juegan los incendios naturales y las quemadas agrícolas en las zonas aledañas, y cuál es su impacto en el ecosistema del sitio de estudio?

- ¿Qué efecto tienen los eventos extremos (tormentas tropicales, sequías, plagas, etc.) en la capacidad de secuestro de carbono por la vegetación en el bosque tropical subperennifolio?
- ¿Es posible detectar y cuantificar el impacto del calentamiento global en los ciclos ecosistémicos, a través del estudio a largo plazo de su variabilidad intrínseca y de las anomalías detectadas en dichos ciclos?



**Figura 1.** Diagrama conceptual del Observatorio Mexicano del Clima y la Composición Atmosférica para la validación de datos satelitales y estudios de ciclo de carbono y de los impactos de la contaminación en un bosque tropical del sureste de la República Mexicana.

## **2. Análisis detallado del diseño conceptual y las especificaciones para la puesta en marcha del OMECCA**

### **2.1. Características técnicas de la estación e instrumentación**

Para la ejecución de este proyecto, se diseñó un Laboratorio Móvil con las características necesarias para poder alojar los instrumentos descritos más adelante y que éstos puedan operar de manera adecuada. También se tomaron en cuenta los requerimientos para que los equipos funcionen de manera óptima y bajo condiciones favorables, siendo capaz la infraestructura de resistir la adversidad del ambiente donde va a ser colocado.

Para ello, se hizo el diseño de un contenedor marítimo acondicionado como laboratorio, con características específicas acorde a los requerimientos de la seguridad y condiciones de operación de los instrumentos. A continuación se presenta un diagrama de la configuración del contenedor de 20 pies de largo (6 m aproximadamente) que se mandó fabricar con un proveedor altamente calificado y con experiencia en este tipo de proyectos:

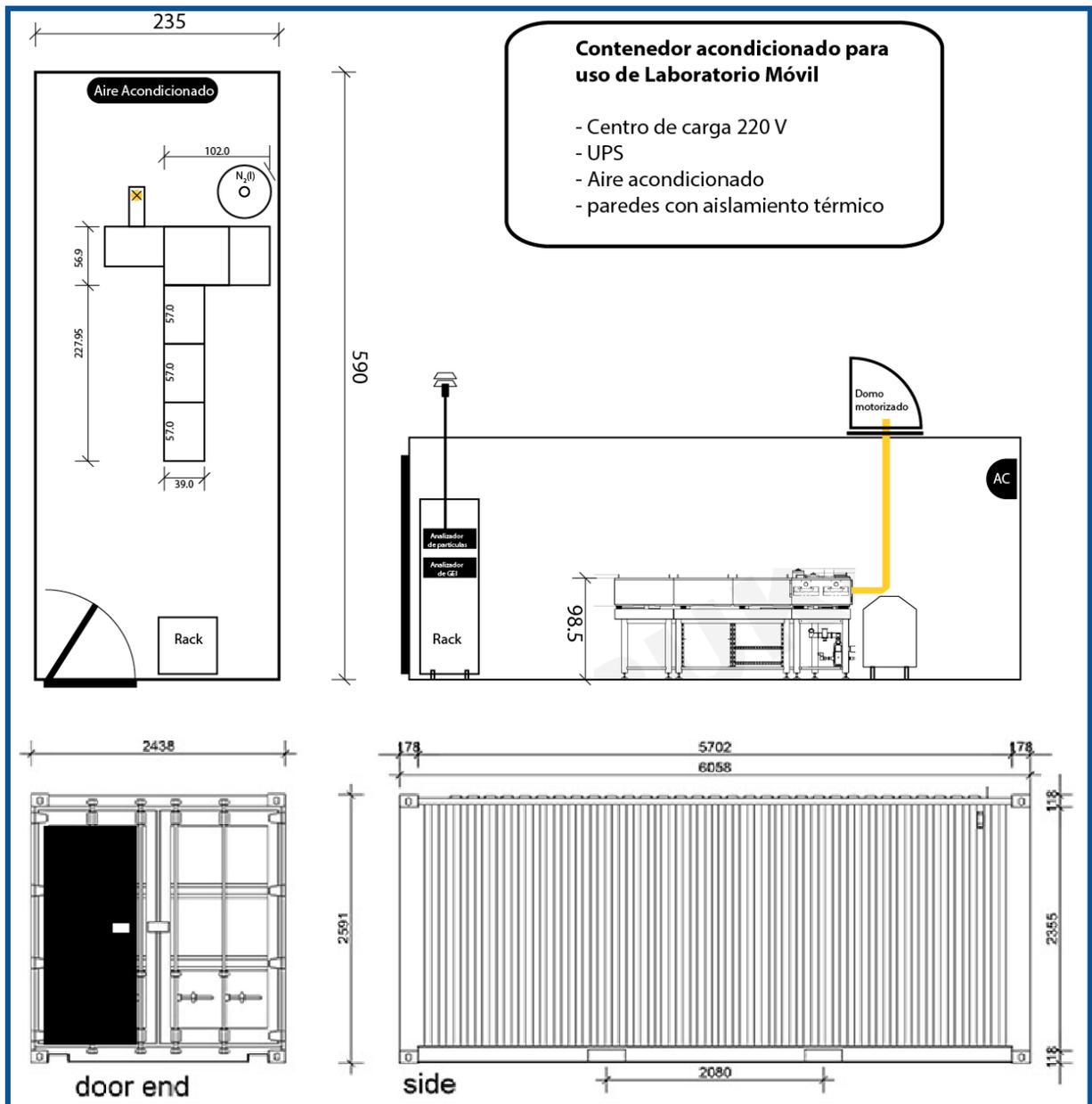


Figura 2. Diseño del contenedor marítimo acondicionado para alojar el OMECCA.

## 2.2. Determinación de la densidad de columnas atmosféricas

### a. CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO y H<sub>2</sub>O

#### La red TCCON

TCCON (**Total Carbon Column Observing Network**) es una red global de instrumentos que miden el contenido total de bióxido de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO, N<sub>2</sub>O y otros gases traza en la columna vertical de la atmósfera terrestre. La red inició operaciones en el año 2004 con la instalación del primer instrumento en Park Falls, Wisconsin (EUA) y actualmente operan 23

instrumentos en todo el mundo (Fig. 3). TCCON está diseñada para la investigación del flujo de carbono entre la atmósfera, el suelo y el océano a través de los ciclos que regulan tanto sus emisiones como los sumideros. Esto se logra a través de la determinación de la fracción molar de la masa total de estos gases en el aire y a través de los años ha contribuido de manera significativa al entendimiento que la comunidad científica tiene actualmente de los procesos que regulan el ciclo de carbono y la variabilidad de los gases de efecto invernadero.



**Figura 3.** El mapa a la izquierda presentado en la reunión anual de TCCON celebrada en Junio del 2022, muestra las estaciones que han estado activas y contribuyendo a TCCON en los últimos años, así como aquellas que están planeadas como es el caso de OMECCA, a ser colocada en algún sitio de la Península de Yucatán.

Uno de los papeles más importantes de la red TCCON es proveer información independiente en apoyo y para la validación de varias misiones satelitales como son los programas de GOSAT (Greenhouse Gases Observing Satellite) y OCO (Orbiting Carbon Observatory). En un futuro cercano, esta importante red de instrumentos de superficie terrestre será la base para el programa de validación de la misión GeoCarb, que será la primera misión satelital dedicada al estudio del ciclo de carbono sobre una órbita geoestacionaria.

*Instrumentación: IFS 125HR*

El instrumento principal de cada estación perteneciente a TCCON es un espectrómetro infrarrojo de alta resolución por transformada de Fourier (FTIR, por sus siglas en inglés) de la marca [Bruker](#) modelo IFS 125HR, cuyas especificaciones se detallan en la tabla 1.

Tabla 1. Especificaciones del espectrómetro infrarrojo IFS 125/HR

<p><b>Infrared Fourier Spectrometer IFS 125HR</b></p> <p><i>High-resolution research spectrometer with modular vacuum optics for mid-IR measurements. The instrument can be optionally extended for measurements from the far IR to the UV ranges and equipped with automation units. Scanner with <math>0.0063\text{ cm}^{-1}</math> resolution.</i></p> <p style="text-align: center;"><b>Seguidor Solar</b></p>  <p style="text-align: center;"><b>Espectrómetro Infrarrojo</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- High power IR source with source cooling unit</li> <li>- Two aperture wheels with 16 positions each</li> <li>- CaF2 BEAMSPLITTER for IFS125HR, spectral range <math>14,000\text{-}1,850\text{ cm}^{-1}</math>, <math>2^\circ</math> air-gap wedge, requires special spectrometer-adjustment to the deviant air-gap wedge of 2 degrees,</li> <li>- CaF2 window, <math>90\times 8\text{mm}</math>, wedged, with spacer for window flange, <math>90\times 15\text{mm}</math></li> <li>- Filter changer for 8 filter positions for detector 1 and 2 Filter diameter: 25mm (without optical filters)</li> <li>- Optional Mirror Coating: bare Gold Spectral range: <math>15,800\text{-}10\text{cm}^{-1}</math></li> <li>- Mirrors coated with gold instead of aluminum</li> <li>- Sun tracker mirror coating: protected aluminum, Mirror diameter 150 mm Remote control via HTML user interface</li> <li>- Input port for parallel radiation (<math>D=70\text{ mm}</math>), left side with window flange.</li> <li>- Enlarged source chamber</li> <li>- NIR source (tungsten lamp), water cooled including holder and power supply.</li> <li>- Unit to reach a room temperature detector.</li> <li>- Beam switching unit to select additional detector position.</li> <li>- Room temperature InGaAs detector, spectral range: <math>12,800\text{-}5,800\text{ cm}^{-1}</math> (<math>780\text{-}1,725\text{nm}</math>)</li> <li>- InSb detector, spectral range: <math>9,600\text{ - }1,850\text{ cm}^{-1}</math></li> <li>- Data System, High-Performance (Intel i7 processor, 3GHz, 16GB RAM, 256GB SSD, 1TB Hard Drive, 23.8" min. TFT display) or better.</li> <li>- OPUS/IR, FT-IR Spectroscopy Software Package version 8</li> </ul>
--	--

La metodología consiste en guiar la luz directa del sol hacia el espectrómetro haciendo uso de un rastreador solar y la óptica necesaria. El instrumento a través del principio de interferometría captura el espectro del Sol que contiene la información detallada de todas las especies químicas que absorben en el rango del infrarrojo cercano. De esta forma, las intensidades detectadas de las bandas de absorción producidas por el  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  y otros gases traza son proporcionales a su abundancia y por consiguiente la concentración

integrada en toda la atmósfera se puede determinar con una muy alta precisión y exactitud. La limitante más importante, sin embargo, es que con esta técnica sólo se puede medir de día y en condiciones de cielo despejado, que es cuando de cualquier forma los satélites también hacen sus observaciones más confiables.

### Análisis de datos

Para el análisis de espectros de absorción solar medidos por el IFS 125HR se utiliza un algoritmo de ajuste no lineal por mínimos cuadrados llamado GFIT. Éste contiene un sofisticado modelo directo, que simula un espectro atmosférico de transmitancia con datos prescritos de entrada, como son los perfiles de presión, temperatura y de la información *a priori* de los gases para la cual se usan los perfiles climatológicos de la localidad a partir de modelos globales. El otro componente de GFIT es el modelo inverso, que compara cada espectro medido con el calculado y determina cuál es la combinación de parámetros para obtener el mejor ajuste de la variable que se pretende recuperar.

Para los cálculos línea-a-línea, GFIT asume formas de la línea con perfiles tipo Voigt aunque también puede usar otras formas en casos de mezclado entre líneas y otros efectos espectroscópicos que pueden obstaculizar un buen ajuste. El código de recuperación reutiliza los coeficientes obtenidos en el mismo día para acelerar los cálculos y obtener mejores ajustes. Los Jacobianos se calculan analíticamente en paralelo con el análisis de espectros, los cuales se usan en los ajustes de los vectores de estado para también llegar más rápido a la solución y con mejores resultados. El código puede usarse en diferentes geometrías de observación y no sólo en la de absorción de radiación solar directa, y toma en cuenta la curvatura de la Tierra y su refractividad.

La nueva versión del modelo, GGG2020, usa 51 capas en la vertical y los intervalos van aumentando con la altura. Utiliza la presión atmosférica medida en la superficie para determinar el perfil en esa locación y una biblioteca con más de 15 mil líneas solares para simular el espectro exo-atmosférico. GFIT para las estaciones TCCON, no recupera un perfil sino que asume un perfil conocido para cada gas y lo ajusta a la medición. Esto hace el cálculo mucho más rápido y evita algunos errores sistemáticos que los modelos que hacen recuperaciones de perfiles presentan en ocasiones. Este tipo de recuperación tipo escalamiento de perfiles es válido para gases cuya distribución vertical no cambia tanto como es el caso de CO<sub>2</sub> y el mismo oxígeno (O<sub>2</sub>). En cuanto a la forma instrumental de la línea, GFIT hace una convolución numérica de una función SYNC, representando el decaimiento óptico finito, con una función RECT representando el campo óptico de visión finita del instrumento.

Las salidas de GFIT más relevantes son, naturalmente: 1) los factores de escalamiento para la obtención de las razones de mezclado por volumen (VMR) de cada gas de interés, y 2) la información sobre la incertidumbre del parámetro recuperado. Ésta se obtiene de los

elementos diagonales de la matriz inversa de covarianza, que son multiplicados por los a priori de la columna vertical.

## b. NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, HCHO y SO<sub>2</sub>

### La Red Global Pandonia (PGN)

Como instrumentos para la medición de NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, HCHO y SO<sub>2</sub> en la columna vertical de la atmósfera, se utilizan los fotoradiómetros espectrales llamados PANDORA que se describen abajo. Éstos son considerados como instrumentos de referencia para una amplia variedad de usos incluyendo la validación de productos satelitales. La red PGN realiza la calibración de sus instrumentos y el procesamiento de los datos de manera centralizada, con el fin de

homogeneizar el análisis y minimizar los posibles sesgos que pudieran surgir por tener diferencias en las configuraciones instrumentales, componentes ópticos, formatos y métodos para el análisis de datos.



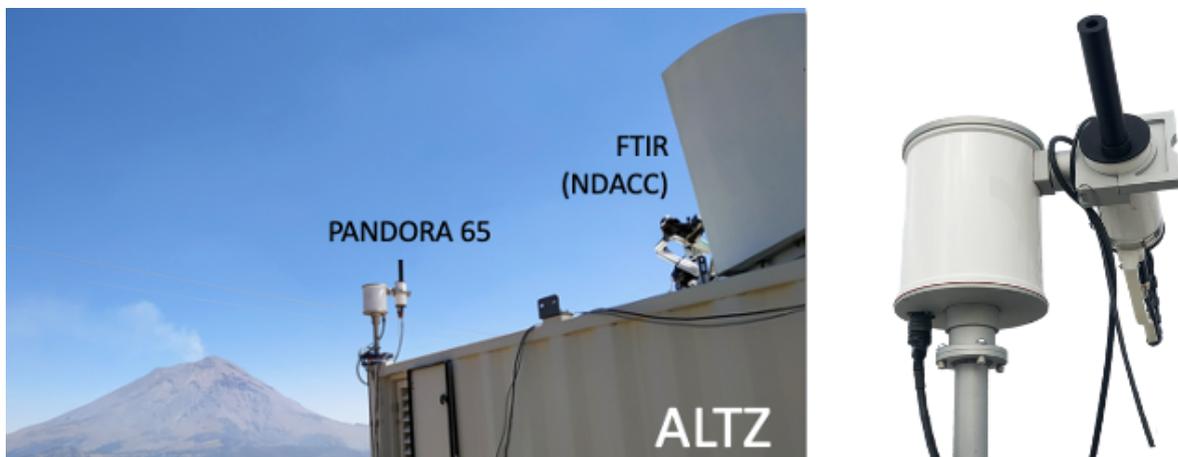
**Figura 4.** Mapa de la red de PANDORAS mostrando la ubicación de 3 instrumentos instalados en el centro de México.

La red PGN es una iniciativa con apoyo de la NASA y la ESA que tiene como objetivo apoyar los esfuerzos de validación de varias misiones satelitales enfocadas en estudios de la química y física de la tropósfera como es la calidad del aire, los aerosoles, las nubes, etc. Para ello se creó una empresa Luftblick OG en Austria, que además de coordinar las tareas de la red PGN y asegurar el buen funcionamiento de los instrumentos que pertenecen a ella, también desarrolla y mejora los algoritmos de análisis y pone los productos de todas las estaciones en un repositorio que pone a disposición de la comunidad y el público en general toda la información que se genera en la red.

### Instrumentación: Pandora

El instrumento PANDORA es un fotorradiómetro espectral dotado de un espectrómetro miniaturizado tipo Czerny-Turner, que usa un detector CCD de 2048 × 64 pixeles (AvaSpec-ULS2048x64) y una malla holográfica de 1200 líneas/mm para medir espectros en el rango de 280 a 530 nm con una resolución espectral de aprox. 0.6 nm. El instrumento cuenta con un sistema de seguimiento solar basado en dos motores y una mira telescópica

que dirige la radiación directa del Sol a una fibra óptica, que guía la luz solar hacia el espectrómetro. El cabezal del rastreador cuenta con dos ruedas giratorias, para escoger la combinación de filtros, tanto de densidad neutral, polarizadores o de interferencia, que se emplean durante una secuencia de medición. Para reportar los productos disponibles en la Red Global Pandonia (PGN, 2022), se realiza un procesamiento centralizado en el que se utilizan los espectros medidos y la información específica de cada sistema para la calibración. Los productos de columna total de los gases recuperados corresponden al contenido de esa especie entre la superficie y el tope de la atmósfera. Actualmente existen algoritmos para recuperar  $\text{NO}_2$ ,  $\text{HCHO}$  y  $\text{O}_3$ , entre otros parámetros. El instrumento tiene la capacidad de medir en modo MAX-DOAS para obtener información adicional en la vertical (Cede et al. 2019). Los productos de la red PGN están disponibles al público en general (PGN, 2022).



**Figura 5.** Izq: Fotografía de los sensores remotos Pandora y FTIR que se operan en el observatorio atmosférico de altura en Altzomoni, Parque Nacional Iztá-Popo. Derecha: cabezal de sistema de seguimiento solar del instrumento Pandora.

## 2.3. Concentración de contaminantes y gases de efecto invernadero en superficie

### a. Gases contaminantes y de efecto invernadero

#### Instrumentación

Para el monitoreo de la concentración a nivel de superficie de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}$ , su variabilidad diurna, estacional e interanual, se empleará un espectrómetro de extinción anular en cavidad (*Cavity Ring-Down Spectrometer*, CRDS por sus siglas en inglés) marca Picarro Inc. modelo G2401. Se trata de un instrumento de última generación que mide con una precisión por debajo de 50 ppb para  $\text{CO}_2$ , 1 ppb para  $\text{CH}_4$  y 15 ppb para  $\text{CO}$ . El muestreo de aire atmosférico se efectuará a una altura máxima de dos veces la altura promedio de la vegetación. La toma de muestra se ubicará en lo alto de una torre metálica adyacente al

contenedor, se protegerá con un guarda-lluvias de PVC, y la muestra se conducirá al CRDS utilizando tubo synflex 1300 (Eaton).

El CRDS se alojará en el contenedor de clima controlado y estará equipado con un filtro secador de nafión MD-170-144SS (Perma Pure LLC), que permitirá monitorear la fracción molar de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y CO en aire seco. Para la calibración del CRDS se contará con tres cilindros de mezcla gaseosa, con concentraciones conocidas de los tres gases bajo consideración (Tabla 1). Estos cilindros constituyen estándares preparados directamente por el Global Monitoring Laboratory de la agencia estadounidense NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), trazables a las escalas WMO X2019 para CO<sub>2</sub>, WMO X2004 para CH<sub>4</sub> y WMO X2014A para CO.



Fig. 6 Espectrómetro de extinción anular en cavidad (CRDS) Picarro G2401

Adicionalmente, se equipará al CRDS con un cilindro ‘blanco’ de mezcla gaseosa, también llamado ‘target’, que no participa propiamente de las calibraciones, es tratado rutinariamente como si no se conociese su concentración, y cuyo uso tiene por objeto la estimación de incertidumbre de las mediciones y el seguimiento del impacto de las variaciones en temperatura y presión en el monitoreo continuo (Tabla 2) (Yver-Kwok et al. 2021).

Los ciclos de calibración y monitoreo atmosférico se controlarán por medio de una válvula múltiple giratoria EMTSD6MWE (Vici Valco Instruments) de seis puertos, siguiendo el esquema temporal indicado en la tabla 2.

### Análisis de datos

El tratamiento de los datos seguirá las rutinas y especificaciones establecidas por la red europea ICOS (Integrated Carbon Observation System; Yver-Kwok et al. 2021), que asegura la comparabilidad de las mediciones entre estaciones de todo el mundo. Las series de tiempo de la concentración atmosférica de cada gas se utilizarán para calcular ciclos diarios, estacionales y anuales, así como para obtener la tasa de crecimiento anual y la variabilidad interanual de la concentración de fondo de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>, dadas las condiciones prístinas y aisladas de fuentes de emisión cercanas al sitio de medición.

Los datos crudos serán enviados diariamente a un servidor de la red ICOS así como a un servidor de almacenamiento de la RUOA ubicado en Ciudad Universitaria, en la CDMX. Las concentraciones atmosféricas corregidas, en promedios horarios y de cada minuto serán recuperadas de los servidores de la red ICOS y puestas a disposición del público a través de la página web de la RUOA (Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos, [ruoa.unam.mx](http://ruoa.unam.mx)), a la cual pertenecerá el OMECCA.

**Tabla 2.** Composición y protocolo de uso de los cilindros de mezcla gaseosa en los procedimientos de calibración y seguimiento del CRDS Picarro.

Cilindro	Composición	Uso	Frecuencia de inyección	No. ciclos de inyección
Cal_1	390 ppm CO <sub>2</sub> 1820 ppb CH <sub>4</sub> 100 ppb CO	Calibración	20 min, 1 vez/mes	4
Cal_2	405 ppm CO <sub>2</sub> 1890 ppb CH <sub>4</sub> 125 ppb CO	Calibración	20 min, 1 vez/mes	4
Cal_3	420 ppm CO <sub>2</sub> 1960 ppb CH <sub>4</sub> 150 ppb CO	Calibración	20 min, 1 vez/mes	4
Target	400 ppm CO <sub>2</sub> 1900 ppb CH <sub>4</sub> 100 ppb CO	Seguimiento	20 min, c/20 horas	1

### b. Partículas atmosféricas

La medición de partículas finas será de gran relevancia para conocer el impacto que pudieran tener fuentes externas de contaminación, como son los incendios forestales o las actividades en las que se emplea la quema agrícola o de residuos. También el observatorio puede ser captador de otras fuentes antropogénicas que producen contaminación que es transportada hasta el sitio de medición, como es la de los vehículos automotores y de carga o industriales.



Fig. 7. Monitor de material particulado fino (PM2.5) Teledyne T640

Por otra parte, la fracción PM2.5, que comprende las partículas con un diámetro menor a 2.5 micrómetros, pueden ser transportadas distancias muy largas como es el caso del polvo del Sahara, que se sabe que en condiciones particulares que se dan en ciertas épocas del año, puede llegar a las costas del Caribe.

Se empleará un analizador marca Teledyne modelo T640 de partículas finas (PM2.5) basado en la espectroscopía de banda ancha usando la dispersión a 90° de luz blanca con un LED policromático. Este instrumento, es capaz de medir concentraciones > 0.1 µg/m<sup>3</sup> cada minuto con una precisión de 0.5 µg/m<sup>3</sup> y es considerado un método de referencia equivalente por la Agencia de Protección Ambiental de los EUA (EPA).

### c. Depósito atmosférico

Muestreos específicos del depósito húmedo y seco proporcionan información muy valiosa sobre las condiciones ambientales del aire ambiente y por lo tanto del impacto que pudieran tener las emisiones de otras regiones. El depósito atmosférico es la cantidad de cualquier compuesto suspendido en la atmósfera que se ha precipitado a la superficie de la tierra (expresado en kg/ha). Si desciende por acción del viento y la fuerza de gravedad, en ausencia de fase acuosa, se denomina depósito seco y si desciende por acción de algún tipo de precipitación meteorológica (lluvia, nieve, granizo, neblina) se denomina depósito húmedo (US-EPA, 2016; 2017; NADP, 2017).

El depósito atmosférico como producto del mecanismo natural de limpieza, es un indicador útil de niveles de contaminación, contiene compuestos que son producto de la reacción de los gases, aerosoles, partículas, etc., que han sido introducidos a la atmósfera por diferentes fuentes de emisión, por lo que su especiación química aporta datos valiosos acerca de entradas de nutrientes y compuestos tóxicos a los sistemas terrestres y acuáticos, a nivel local y regional (Parungo et al., 1990). Una vez emitidos los contaminantes pueden seguir varios procesos: viajar varios kilómetros desde su lugar de formación y dispersarse siendo depositados lejos de donde fueron emitidos (Legge and Krupa, 1990); pueden reaccionar química o fotoquímicamente y transformarse, este proceso puede darse de forma paralela al anterior, o bien pueden depositarse en la superficie terrestre, ya sea como depósito húmedo o seco.

La saturación del vapor de agua con determinados gases que se encuentran de forma natural presentes en la atmósfera, tales como el  $\text{CO}_2$ , los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), el  $\text{SO}_2$ , etc., conlleva a la formación de compuestos que imparten al agua características ácidas, como es el caso del  $\text{CO}_2$ . Este gas, al reaccionar con la humedad atmosférica da lugar a la formación de ácido carbónico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ), el cual hace descender su pH hasta 5.6 unidades, por lo que este valor es considerado "normal" en la lluvia. Sin embargo, la presencia de otros contaminantes como los  $\text{NO}_x$  y el  $\text{SO}_2$  conducen a la formación de ácidos más fuertes que hacen descender el valor de pH de la lluvia por debajo de 5.6 unidades. De acuerdo con los criterios de la US-EPA, se clasifica como lluvia con características ácidas cuando el valor de pH de la lluvia es menor a 5.6 unidades. A diferencia de lo que comúnmente se define como disolución ácida (aquella que posee un valor de pH menor de 7 unidades).

El depósito atmosférico puede tener un efecto significativo sobre la aportación de compuestos esenciales o potencialmente dañinos para los sistemas naturales, afectando el crecimiento y desarrollo de las plantas tanto en ecosistemas terrestres como acuáticos. Los efectos que la lluvia ácida ocasiona en los sistemas acuáticos, tales como arroyos, lagos y humedales, se observan principalmente en cuerpos de agua sensibles. En áreas con poca capacidad de amortiguamiento a los cambios de pH, la lluvia ácida disuelve el aluminio de los suelos, el cual puede ser transportado a los lagos y arroyos cercanos. El aluminio es

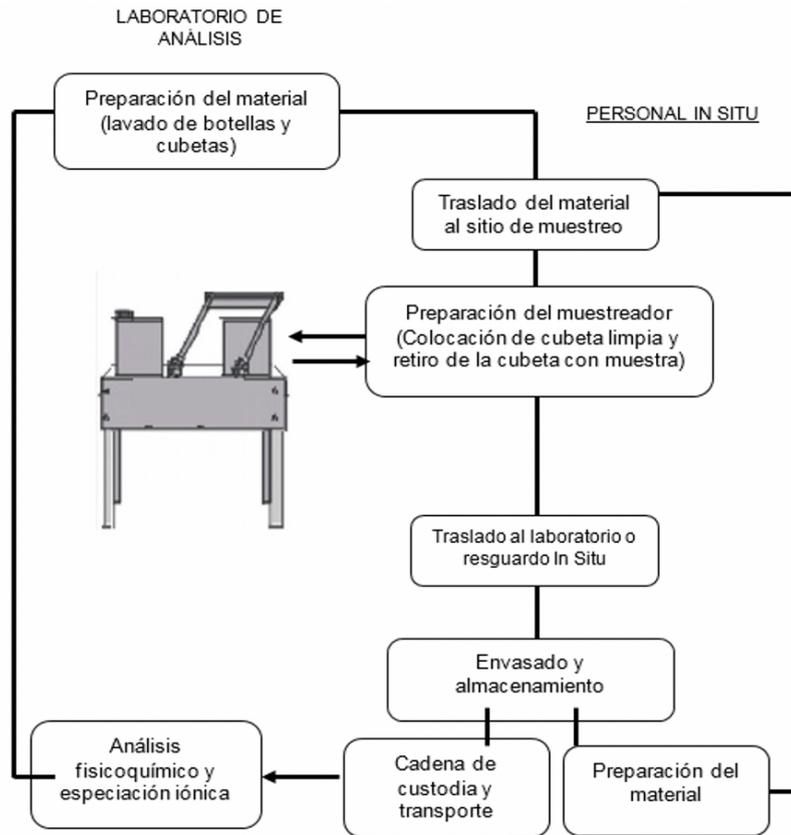
sumamente tóxico para muchas especies de organismos acuáticos. Así mismo, el mercurio, un contaminante tóxico constituye un elemento traza de gran interés debido a la bioacumulación en la cadena alimenticia (Sullivan et al., 1989, Shi et al., 2015).

Desde el punto de vista cultural y patrimonial, el depósito atmosférico ácido también afecta de forma directa al patrimonio cultural, ya que daña edificios, monumentos históricos, estatuas y otras estructuras de importancia cultural cuya pérdida sería invaluable e irreparable. El daño se presenta en los materiales que recubren o forman dichas estructuras, las cuales están compuestas principalmente de roca caliza ( $\text{CaCO}_3$ ), material muy susceptible a la degradación por ácidos (Bravo et al., 2006); así mismo, contribuye al deterioro de pinturas, revestimientos y metales como el bronce (Mendoza-Cruz et al., 2014; Knotková and Kreislová, 2007).

Como parte del proyecto OMECCA, se va a evaluar la composición química del depósito atmosférico húmedo en la Reserva de la Biósfera de Calakmul, Campeche, incluyendo la Zona Arqueológica. En una primera etapa se procederá a instalar el equipo de colección automático de muestras de depósito húmedo y seco de forma separada, de acuerdo a los criterios establecidos por la US-NADP. La Figura 8 muestra el protocolo seguido para la colección de las muestras, cadena de custodia y envío al laboratorio para su análisis. El sistema de muestreo del depósito húmedo y seco recomendado por la US-NADP, es el Aerochem Metrics, modelo 301, el cual consiste en un dispositivo de dos cubetas, en las que se separa el depósito húmedo del seco de forma automática evitando que haya mezcla de contenidos y preservando la muestra hasta su colecta.

El Aseguramiento de Calidad y el Control de Calidad (AC/CC) constituyen una parte esencial de todo sistema de medición. Ambos incluyen una secuencia global de actividades que aseguran que las mediciones cumplan con normas de calidad definidas dentro de un nivel de confianza establecido. Previo a la ejecución del programa de medición, se diseña un programa de muestreo que considera un plan de AC/CC, el cual permite obtener datos fiables. Las actividades de AC incluyen las fases previas a las mediciones dentro del muestreo: la determinación de objetivos, calidad de los datos, designación del sistema de muestreo, selección del sitio, evaluación del equipo e instrumentos de medición y la capacitación de los operadores. Las funciones de CC comprenden las actividades realizadas para obtener la exactitud y precisión en la medición; operación y mantenimiento de equipo, calibraciones de los sistemas de medición, capacitación de los operadores, protocolos, cadena de custodia, verificación y validación de datos.

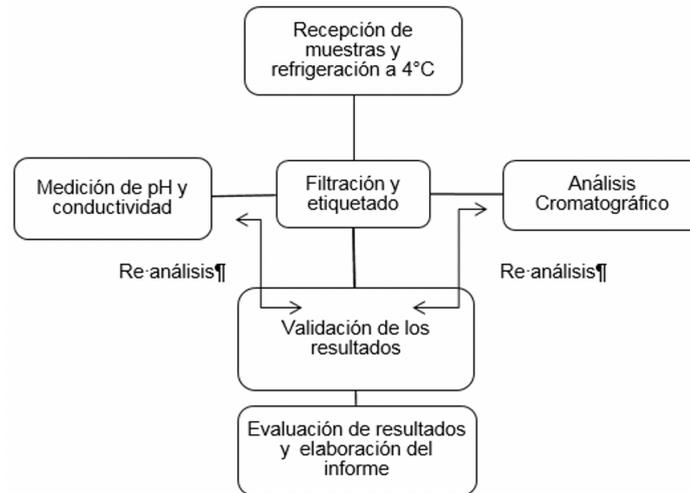
Dentro de las actividades del programa de AC/CC, realizadas en los laboratorios de la Sección de Contaminación Ambiental del ICAyCC de la UNAM, cada etapa de la colección de muestras hasta la entrega de estas en el laboratorio, se lleva a cabo a través de una cadena de custodia, donde los responsables registran la obtención de muestras, su transporte y la entrega de estas al laboratorio para la realización de su análisis.



**Figura 8.** Protocolo de muestreo del depósito atmosférico (húmedo y seco).

Una vez recibidas las muestras en el laboratorio y firmada la cadena de custodia se procede a filtrarlas y posteriormente realizar el análisis fisicoquímico. Las muestras se filtran con membranas de 0.22  $\mu\text{m}$  de poro en un sistema de filtración al vacío, en un plazo no mayor a 9 días a partir de su recolección. Posteriormente se analizarán en el laboratorio, los iones principales ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{Cl}^-$ ), pH y conductividad eléctrica (EC) de acuerdo a los protocolos de la “World Meteorological Organization” y del “National Atmospheric Deposition Program” de los Estados Unidos (Figura 9).

Además de las medidas de control de calidad implementadas durante el muestreo y análisis de las muestras, antes del procesamiento de datos, los valores obtenidos deben ser verificados y validados (WMO, 2004). Esta actividad se realiza matemáticamente para asegurar que todos los registros (nombres, fechas, horas, lugares, números de identificación, etc.) estén libres de errores. Los procedimientos de entrada de datos deben incluir la comprobación de errores. La US-NADP recomienda que los datos se transfieran electrónicamente entre el instrumento y el ordenador, tanto como sea posible, esto reduce al mínimo la necesidad de introducir de forma manual los datos y así evitar errores.



**Figura 9.** Protocolo para el análisis de muestras de depósito atmosférico húmedo.

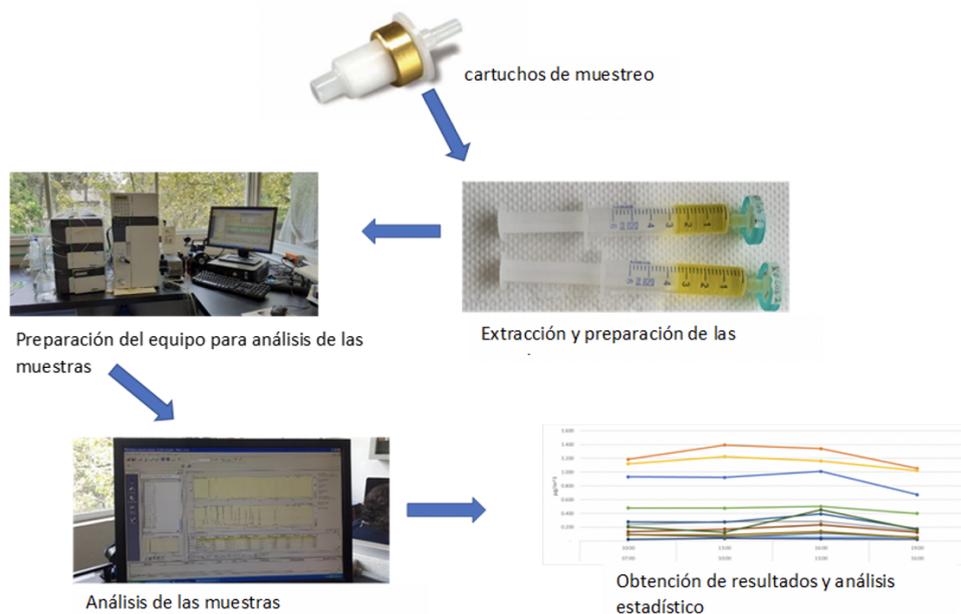
La validación de los datos se realiza mediante los siguientes parámetros: realizar el balance iónico de las especies químicas registradas y posteriormente comparar con el resultado de la conductividad medida y calculada para posteriormente, calcular el depósito de cada analito en kg/ha, mediante el producto de su concentración con el volumen del evento, multiplicado a su vez por un factor de conversión. Cada depósito se suma conforme los períodos deseados (mes o año).

#### d. Carbonilos atmosféricos

Los compuestos carbonilos atmosféricos, incluidos los aldehídos y las cetonas, son un grupo de compuestos orgánicos volátiles oxigenados (OVOC's, por sus siglas en inglés), importantes precursores y componentes en la química de la atmósfera [Atkinson, 2000; Atkinson and Arey, 2003]. Los compuestos carbonilos reaccionan con el radical hidroxilo ( $\cdot\text{OH}$ ) para generar radicales  $\text{HO}_2$  y  $\text{RO}_2$ , que pueden oxidar  $\text{NO}$  a  $\text{NO}_2$  y promover aún más la formación de  $\text{O}_3$  en la troposfera [Rao et al., 2016]. Los carbonilos son intermediarios importantes en la formación de aerosoles secundarios y están ampliamente distribuidos en la troposfera [Lu et al., 2012]. A pesar de que la fuente principal de compuestos carbonilos atmosféricos son las emisiones directas de las actividades humanas y la quema de combustibles fósiles, otros procesos naturales y de quema de biomasa contribuyen de manera importante [Edwards et al., 2013] participando en reacciones de oxidación atmosférica [Hyun et al., 2008]. La oxidación de los compuestos carbonilos produce ácido fórmico, ácido acético y otras sustancias ácidas, que pueden aumentar la acidez atmosférica, intensificar la formación de lluvia ácida y dañar el medio ambiente [Stavrakou et al., 2012]. Sin embargo, la medición de los carbonilos atmosféricos es difícil y exigente debido a sus bajas concentraciones en la atmósfera, amplio rango de variación, alta reactividad, propiedades químicas inestables y corta vida atmosférica.

La metodología de muestreo y análisis se realizará siguiendo estrictamente con el Método TO-11A de la EPA de EE. UU. [US,EPA,1999]. Las muestras de aire se colectarán utilizando los siguientes tipos de muestreo:

- a) Tubos de muestreo de columna de sílice (Waters Sep-Pak DNPH-Silica, Water Corp).
- b) Cartuchos (Water Sep-Pak DNPH-Silica, Waters Corp).



**Figura 10.** Procedimiento para el análisis de carbonilos en aire ambiente.

En ambos sistemas el paso de aire se fuerza a condiciones de flujo controlado donde los carbonilos presentes en la muestra quedan atrapados en el 2,4-DNPH a un flujo de flujo de 1,2 L/min; mientras tanto, se recolecta un blanco de laboratorio y un blanco de campo cada 2 días para garantizar la calidad. Éstos se llevan al laboratorio y se diluyen con una solución pura de acetonitrilo formando la reacción de derivatización para formar 2,4-dinitrofenilhidrazonas, denominadas comúnmente como hidrazonas. El análisis se realizará en un Cromatógrafo de Líquidos de Alta Resolución (HPLC, por sus siglas en inglés) con detector de absorción ultravioleta-visible a una longitud de onda de 360 nm.

Se preparan curvas de calibración en un rango de 0.05 a 0.405 ppm con una mezcla de estándares de formaldehído, acetaldehído, propionaldehído, butiraldehído acroleína, acetona, y crotonaldehído. Para el control de calidad se evaluarán blancos de campo y de laboratorio, se evaluará la reproducibilidad para garantizar la calidad de los análisis, y se determinarán los límites de detección del método definidos como tres veces la desviación estándar de los blancos o, tres veces la desviación estándar de la concentración más baja de los estándares analíticos.

## 2.4. Flujos de carbono, agua y energía en vegetación y suelo

### a. Técnica de covarianza turbulenta y balance de energía

#### Instrumentación

El monitoreo de los principales intercambios de carbono y energía entre la vegetación y la atmósfera se llevará a cabo utilizando la técnica de covarianza turbulenta (*eddy covariance*) (Swinbank, 1951; Aubinet et al. 2000), que consiste en la medición simultánea y a alta frecuencia (10 Hz) de las fluctuaciones en la velocidad vertical del viento y la concentración de un escalar de interés; la covarianza o producto de estas variaciones constituye el flujo vertical del escalar. Los escalares a medir serán CO<sub>2</sub>, vapor de agua y temperatura, lo cual proporcionará el intercambio neto de CO<sub>2</sub> del ecosistema (*NEE*), y los flujos de calor latente (*LE*) y calor sensible (*H*), respectivamente. La técnica es directa, continua y no destructiva, y permite cuantificar los intercambios de carbono, agua y energía a escalas temporales que van de minutos a décadas (Baldocchi, 2020).

Se instalará una torre metálica arriostrada, del tipo comúnmente utilizado en telecomunicaciones, de altura máxima igual a dos veces la altura promedio de la vegetación en el sitio elegido para el OMECCA (Fig. 1) o uno cercano. El sitio elegido para ubicar la torre deberá ser plano en una extensión de aproximadamente 1 km alrededor de la torre, y cubierto uniformemente por Selva Alta Subperennifolia, el tipo de vegetación dominante en la zona. En lo alto de esta torre se ubicarán los instrumentos básicos de un sistema de *eddy covariance*: un anemómetro ultrasónico 3D (Gill Windmaster Pro, Gill Instruments) que proporcionará la velocidad vertical del viento (*w*), un analizador no dispersivo de vía abierta que medirá la concentración de CO<sub>2</sub> (*c*) y vapor de agua (*q*) en el aire (LI-7550A, Li-Cor Environmental). La temperatura del aire (*T<sub>a</sub>*) será medida por un termopar fino FW3 (Campbell Sci.) tipo E, de 0.003 in de diámetro.

Cada 30 minutos, se promediarán la covarianza entre *w* y las magnitudes escalares, después de efectuar una rotación en el sistema de coordenadas para forzar la media de *w* a cero. El almacenaje de CO<sub>2</sub> (*S<sub>c</sub>*) por debajo de la altura de medición será muestreado con un conjunto de cuatro tomas de tubo synflex 1300, instaladas a intervalos regulares de altura sobre la torre; el aire proveniente de las tomas será muestreado a intervalos de 5 minutos, utilizando un sensor no dispersivo en el infrarrojo (NDIR) para medir *c* (SenseAir HPP, SenseAir) El intercambio neto de CO<sub>2</sub> del ecosistema (*NEE*) durante cada media hora se calculará como la suma del almacenaje y la covarianza entre *w* y *c*:

$$NEE = \overline{w'c'} + \overline{S_c}$$

El calor sensible (*H*) será calculado a partir de la covarianzas entre *w* y la temperatura del aire *T<sub>a</sub>*, mientras que el calor latente de evaporación (*LE*) se calculará como la covarianza entre *w* y *q* (Stull 1988, Aubinet et al. 2000):

$$H = \rho C_p \overline{w'Ta'}$$

$$LE = \lambda \overline{w'q'}$$

donde  $\rho$  y  $C_p$  son la densidad y el calor específico del aire seco respectivamente, y  $\lambda$  es el calor latente de evaporación del agua (Stull 1988). Las primas en las ecuaciones anteriores indican desviaciones instantáneas con respecto del promedio de la variable durante el periodo considerado (30 min) y la barra superior indica que se promedian dichas desviaciones en el mismo periodo.

Simultáneamente, un radiómetro neto (NR-Lite, Kipp and Zonen), un sensor cuántico (Li-Cor 190S), y un sensor de temperatura y humedad relativa (HMP155A, Campbell Sci.) registrarán respectivamente, la radiación solar neta ( $R_n$ ), la radiación fotosintéticamente activa ( $PAR$ ), y la temperatura y humedad relativa del aire. Para medir la densidad de flujo de calor hacia el suelo ( $G$ ), se emplearán dos platos (HFP01, Hukseflux) colocados en el sustrato a una profundidad de 8 cm y a una distancia de unos 30 m de la base de la torre; dos termopares de cromo-constantán (TCAV, Campbell Sci.) instalados a 2 cm y 4 cm por encima de cada plato se utilizarán para medir la temperatura de la capa superficial del suelo ( $T_{soil}$ ) y calcular el almacenaje de calor en la capa de suelo por encima de los platos (Fig. 1). En la misma área se colocarán dos reflectómetros (CS616, Campbell Sci.) para medir el contenido de humedad del suelo ( $SWC$ ) a dos profundidades, 5 cm y 25 cm por debajo de la superficie; los reflectómetros habrán sido previamente calibrados en referencia al contenido gravimétrico de agua en suelo. Todos los datos meteorológicos serán registrados y almacenados a intervalos de 1 min en un datalogger Sutron 9210B) y promediados cada 30 minutos. Todas las mediciones se llevarán a cabo de manera continua, exceptuando los periodos de calibración y mantenimiento de los aparatos.

El procesamiento de los flujos de carbono, agua y energía se llevará a cabo mediante el software Eddy Pro 7 (Li-Cor Environmental) y código en lenguaje Python, de elaboración propia. Se aplicará un factor de corrección empírico derivado del análisis espectral de los flujos de  $CO_2$ , vapor de agua y temperatura para corregir la pérdida instrumental de mediciones a altas frecuencias. El factor de corrección para flujos de carbono y calor latente, se determinará comparando la densidad coespectral de  $w-c$  y  $w-q$  en relación al coespectro 'ideal'  $w-T_a$  (Goulden et al. 1996). La corrección de Webb, Pearman y Leuning (1980) o WPL para flujos espurios debidos a variaciones en la densidad del aire también será aplicada a los flujos de  $CO_2$  y vapor de agua. Mediante el software Eddy Pro 7 y el código propio se obtendrán además parámetros de la intensidad de la turbulencia en el sitio, como la velocidad de fricción ( $u_*$ ), la energía cinética turbulenta ( $TKE$ ) y el flujo de momentum ( $\tau$ ).

El principio de conservación de la energía en el sistema proporciona una primera medida de la calidad de los datos (Aubinet et al. 2000); el cumplimiento de dicho principio será

evaluado efectuando una regresión de la suma de los flujos turbulentos de energía ( $H + LE$ ) sobre el total de la energía disponible ( $R_n - G$ ).

La técnica de *eddy covariance* mide únicamente el intercambio neto del escalar. En el caso del  $CO_2$ , esto significa que  $NEE$  es la diferencia entre la asimilación total de  $CO_2$  del ecosistema por medio de la fotosíntesis (la Producción Primaria Bruta o  $GPP$ , por sus siglas en inglés) y su pérdida a través de la respiración autotrófica y heterotrófica, la respiración del ecosistema  $R_{eco}$  (Chapin et al. 2002):

$$-NEE = GPP - R_{eco}$$

Para fraccionar  $NEE$  en  $GPP$  y  $R_e$  se emplearán tanto las mediciones de *eddy covariance* como las observaciones independientes de respiración del suelo durante el periodo nocturno para construir una ecuación sitio-específica de la relación entre la temperatura y el contenido de humedad del suelo ( $T_{soil}$  y  $SWC$ , respectivamente) con su tasa de respiración y con  $R_e$ , dado que durante la noche y en ausencia de captura de carbono por fotosíntesis,  $NEE = R_e$ . La ecuación desarrollada se empleará entonces para estimar una  $R_e$  diurna, utilizando los valores de  $T_{soil}$  y  $SWC$  registrados durante el día. Una vez construida la serie temporal de  $R_e$ ,  $GPP$  se calculará por diferencia para cada periodo.

La evapotranspiración ( $ET$ ) del ecosistema se estimará como la cantidad de agua evaporada a partir del calor latente  $LE$ .

### Análisis de datos

Los promedios de cada media hora de los principales flujos de carbono ( $GPP$ ,  $R_e$ ,  $NEE$ ), agua ( $ET$ ) y energía ( $LE$ ,  $H$ ,  $G$ ,  $R_n$ ) se agregarán en series temporales que se utilizarán para construir ciclos diarios, estacionales y anuales de la productividad e intercambio de carbono, vapor de agua y energía en el sitio. Todos los datos crudos y procesados, así como los códigos utilizados para su procesamiento, se pondrán a disposición de la comunidad académica y el público en general de manera transparente y abierta, a través de dos plataformas principales de distribución:

- la página web de la RUOA, que ofrece acceso a archivos de datos mensuales vía http y FTP.
- la red continental de sitios de medición de flujos de carbono, agua y energía Ameriflux (<https://ameriflux.lbl.gov>) que ofrece los datos de cada sitio a diferentes niveles de procesamiento y control de calidad.
- El OMECCA formará parte además de la Red Mexicana de Flujos Ecosistémicos (MexFlux), que agrupa a los sitios ubicados en México, y que contribuyen al repositorio de Ameriflux.

## b. Meteorología

El OMECCA contará con equipo para la observación del tiempo meteorológico. Se registrarán cada minuto los promedios de temperatura y humedad relativa del aire, rapidez y dirección del viento, radiación solar incidente y presión barométrica, así como la precipitación acumulada. La tabla 2 resume los instrumentos a utilizar con este fin y las variables a registrar. Los sensores se ubicarán sobre la torre metálica arriestrada anexa al contenedor, por encima de la estatura máxima del dosel vegetal.

Para el procesamiento y diseminación de la información meteorológica, el OMECCA seguirá los procedimientos de control de calidad, mantenimiento periódico y calibración de la RUOA. Los datos se liberarán con un nivel de calidad L1, es decir como archivos de texto mensuales con datos de frecuencia horaria y de minuto, donde los picos electrónicos y las mediciones físicamente imposibles se han eliminado y reemplazado con 'null'. Los archivos L1 se ponen a disposición de los usuarios a través de la página web de la red y un servidor FTP.

**Tabla 2.** Equipo para observación meteorológica en el OMECCA

Sensor/Equipo	Marca y Modelo	Variable(s)
Termohigrómetro	Vaisala HMP155A	Temperatura y humedad relativa del aire
Piranómetro	Hukseflux SR20-T2	Radiación solar global incidente
Anemómetro	RM Young 05106	Rapidez y dirección horizontal del viento
Pluviómetro	Texas Electronics TE-525MM	Precipitación
Barómetro	Vaisala PTB 110	Presión barométrica
Termohigrómetro interior	Campbell Sci. CS215	Temperatura y humedad del aire al interior del contenedor
Registrador de datos	Campbell Sci. CR1000X	

## c. Propiedades del suelo

Para la caracterización y monitoreo de las propiedades fisicoquímicas y la tasa de respiración del suelo se realizarán campañas de monitoreo que abarquen los distintos períodos meteorológicos del ciclo anual del área de estudio: época de secas, lluvias y nortes. Estas campañas intensas complementarán el monitoreo continuo de la temperatura y la humedad edáfica en por lo menos tres sitios regularmente espaciados entre sí, localizados dentro del

área fuente (*footprint*) de los flujos micrometeorológicos capturados con el sistema de *eddy covariance* de la torre arriestrada. El objetivo de tales sitios es contar con series temporales continuas de las dos variables con mayor influencia en la tasa de respiración (i.e. liberación de CO<sub>2</sub> hacia la atmósfera) en el suelo, y por lo tanto el mayor potencial de alterar el balance de carbono local.

La respiración del suelo  $R_{soil}$  se monitoreará en un total de 10 puntos que comprenderán tanto los sitios permanentes como puntos intermedios; en cada uno de ellos se colocará un cople sanitario de PVC de 15 cm de diámetro y 13 cm de altura, enterrado hasta la mitad, que servirá como collar de apoyo a una cámara cilíndrica de acrílico, equipada con un sensor de CO<sub>2</sub> (NDIR) Vaisala Carbocap GMP 343, que mide la concentración de CO<sub>2</sub> en aire. A partir del incremento de la concentración del gas en la atmósfera atrapada por la cámara, se calcula el flujo de CO<sub>2</sub> emitido por el suelo en periodos de 5 minutos. El monitoreo de  $R_{soil}$  se complementa con mediciones de temperatura y humedad relativa en el ambiente que rodea a la cámara y en el interior de ella, utilizando simultáneamente dos termohigrómetros Campbell CS215 y un termopar tipo E enterrable para medir la temperatura del suelo  $T_{soil}$ .

Los sitios permanentes estarán equipados con los sensores y periféricos detallados en la tabla 3, donde también se indican las variables a registrar en cada ubicación.

**Tabla 3.** Equipo en las estaciones de monitoreo permanente en sotobosque y suelo en el OMECCA

Sensor / Equipo	Marca(s) y Modelo(s)	Variable(s)
Termistores	Campbell Sci 107 y 101 Decagon 5TE	Temperatura del suelo $T_{soil}$ a 4 profundidades
Reflectómetros Sensores de permisividad dieléctrica	Campbell Sci CS106 Decagon 5TE	Contenido volumétrico de agua en suelo SWC a 4 profundidades
Sensor de radiación fotosintéticamente activa (PAR)	Apogee Quantum Sensor	PAR incidente y PAR reflejada en sotobosque
Registrador de datos	Campbell Sci CR1000 Campbell Sci CR3000 Campbell Sci CR5000	

Durante las campañas de monitoreo intensas, en las inmediaciones de cada sitio de monitoreo permanente, se establecerá una parcela rectangular de 4 x 12 m. En cada parcela se tomarán un total de 6 núcleos de sedimento en puntos elegidos al azar; los cilindros serán colectados a dos profundidades (0 a 0.30 m y 0.30 a 0.60 m) usando un nucleador especializado para suelos orgánicos, de 193.3 cm<sup>3</sup> de volumen.

Las propiedades físico-químicas que se evaluarán en los núcleos de suelo serán: la humedad, textura, pH y conductividad eléctrica, siguiendo la NOM-021-RECNAT-2000. La densidad

aparente se determinará en muestras inalteradas colectadas en cilindros de campo y será determinada a partir del método de probeta.

El potencial redox y la temperatura del suelo se determinarán a diferentes profundidades del perfil del suelo (5, 10, 20 y 30 cm), utilizando un electrodo Redox ORP 14 (220mV/pH7) conectado a un medidor de pH/mV/T PCE-228. Para medir el potencial redox, la sonda se introducirá en una solución de la muestra de sedimento diluida con agua destilada, en una proporción sedimento:agua 1:5.

### Humedad

Se utilizará el método gravimétrico descrito por Etchevers et al. (2005), que consiste en la determinación de la masa de agua que contiene una muestra de suelo por diferencia de peso entre la masa de suelo húmedo y la masa de suelo seco de la muestra, considerando como suelo seco aquél secado a temperatura ambiente bajo la sombra.

### Determinación del pH

Para la determinación del pH del suelo se utilizará el método electrométrico descrito por Mylavarapu y Kennelley (2002), usando una solución de agua pura y un potenciómetro. Este método determina la actividad del H<sup>+</sup> por medio de un electrodo sensible a este ion, es decir, si un suelo es ácido o alcalino.

El pH es una propiedad química del suelo, que influye determinantemente en la disponibilidad de los nutrientes minerales en solución para su absorción por el sistema radicular de las plantas.

### Determinación de la Conductividad Eléctrica

La conductividad eléctrica (CE) será analizada por la técnica descrita por Mylavarapu y Kennelley, (2002) que consiste en medir la conductividad eléctrica por medio de un conductímetro que mide la transferencia de electricidad de un extracto en suspensión 1:2 de suelo-agua. La CE de un extracto de suelo se define como la aptitud de éste para transmitir la corriente eléctrica, depende de la actividad de los iones disueltos y permite establecer una estimación cuantitativa de la cantidad de sales que contienen.

### Determinación de la densidad aparente

La densidad aparente (DA) será determina a partir del método de la probeta establecido por Mylavarapu y Kennelley (2002), ya que resulta ser una técnica muy sencilla, pues tan solo se basa en tener el conocimiento de dos parámetros: la masa del suelo y el volumen total, es decir el volumen de los sólidos y el volumen ocupado por el espacio poroso. En el caso de la

masa, ésta se conoce pesando la muestra y en el caso del volumen, éste es determinado de manera indirecta como volumen desplazado en una probeta.

La DA de un suelo se suele utilizar como medida de la estructura del suelo. Una densidad baja, generalmente, equivale a más porosidad y mayores agregados del suelo. Un suelo de bosque saludable tendrá una densidad baja, lo que corresponde a mayor estabilidad, menos compactación y probablemente mayor contenido de humedad que un suelo con una densidad mayor.

### Determinación de textura

La textura indica el contenido relativo de partículas de diferente tamaño, como la arena, el limo y la arcilla, en el suelo. La textura tiene que ver con la facilidad con que se puede trabajar el suelo, la cantidad de agua, aire que retiene y la velocidad con que el agua penetra el suelo y lo atraviesa. La determinación de la textura del suelo se realizará mediante el método de Bouyoucos. Una vez realizado el análisis granulométrico, se determinará la textura del suelo de acuerdo con las claves taxonómicas de suelos del Soil Survey Staff (2014).

### Materia orgánica y carbono orgánico

La materia orgánica se determinará por el método de pérdidas por ignición "LOI" (por sus siglas en inglés "loss of ignition") aplicable a aquellos materiales identificados como turbas, lodos orgánicos y materia vegetal relativamente no descompuesta ni deteriorada o materiales de plantas frescas como madera, raíces, pasto o materiales carbonáceos como lignito, carbón, etc. Este método sirve para determinar la oxidación cuantitativa de materia orgánica en tales materiales y proporciona una estimación válida del contenido orgánico original (Heiri *et al.*, 2001). El peso perdido es proporcional a la cantidad de materia orgánica contenida en la muestra.

Para determinar el carbono orgánico de las muestras de suelo, se debe multiplicar la materia orgánica por un factor de 0.4, el cual indica que el 40% de la materia orgánica es de Carbono orgánico (Heiri *et al.*, 2001).

La determinación de carbono orgánico será a través de la siguiente fórmula:

$$LOI_{550} = \left( \frac{DW_{105} - DW_{550}}{DW_{550}} \right) * 100$$

Donde:

$LOI_{550}$  son las pérdidas de carbono por ignición a 550°C, como porcentaje  
 $DW_{105}$  es el peso seco de la muestra  $DW_{550}$  es el peso seco de la muestra después de someterla a 550°C

El peso perdido es proporcional a la cantidad de carbono orgánico contenido en la muestra.

### Carbono almacenado en suelo

La determinación de carbono almacenado (CA) se llevará a cabo por la siguiente fórmula:

$$CA = (DA)(Pr)(CO)$$

Donde:

CA = Carbono almacenado (Mg ha<sup>-1</sup>)

CO = % carbono orgánico en el suelo

DA = Densidad aparente (g cm<sup>-3</sup>)

Pr = Intervalo de profundidad del suelo (cm).

### Análisis de datos

Con los datos generados se realizarán análisis descriptivos, comparativos y estadísticos de los sitios de muestreo por época climática, posición de la parcela en el gradiente o zonación de vegetación, además de la aplicación de métodos multivariados que nos permitan evaluar la variación de los distintos componentes estudiados con respecto a los parámetros ambientales y climatológicos.

#### **d. Indicadores ópticos de fenología vegetal y temperatura de superficie**

Con el objetivo de evaluar la actividad de la vegetación por medio de índices ópticos de verdor (IV), en la torre arriestrada se colocarán un arreglo de cuatro sensores de radiación, a una altura máxima igual a dos veces la altura promedio de la vegetación en el sitio elegido para el OMECCA. El flujo entrante de Radiación Fotosintéticamente Activa ( $PAR_{in}$ ) será medido por medio de un sensor de fotones (HOBO S-LIA M003, Onset Computer Corp.) orientado verticalmente hacia arriba, mientras que la fracción de PAR reflejada por la vegetación ( $PAR_{ref}$ ) será medida por un sensor idéntico orientado verticalmente a 180° del primero, hacia la superficie del dosel vegetal. Análogamente, la radiación solar global entrante ( $SR_{in}$ ) y reflejada por la vegetación ( $SR_{ref}$ ) serán monitoreada mediante dos piranómetros fotovoltaicos de silicón (HOBO S-LIB M003, Onset Computer Corp.), orientados verticalmente hacia arriba y hacia la superficie del dosel, respectivamente. A partir de estas mediciones, el índice (NDVI) *in situ* de banda ancha será calculado siguiendo a Wilson y Meyers (2007):

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}}$$

donde  $\rho_{RED}$  es la reflectancia en el rojo y  $\rho_{NIR}$  es la reflectancia en el infrarrojo cercano:

$$\rho_{RED} = \frac{PAR_{ref}}{PAR_{in}}$$

$$\rho_{NIR} = \frac{SR_{ref} - 0.45 SR_{in} \rho_{RED}}{0.45 SR_{in}}$$

El Índice de Vegetación Mejorado 2 (EVI2) *in situ* será calculado como (Jiang et al. 2008):

$$EVI2 = 2.5 \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + 2.4\rho_{RED} + 1}$$

Cada 30 minutos, los datos generados por los cuatro sensores serán colectados y almacenados en un datalogger HOB0 H21-001 (Onset Computer Corp.)

Los IVs obtenidos en el periodo comprendido entre dos horas antes y después del mediodía solar (e.g. 11 a 15 horas tiempo local), serán promediados y agregados en una estimación diaria para cada IV. Restringir el uso de NDVI y EVI2 a este periodo evita ángulos solares cenitales menores a 30° y con ello los efectos que el ángulo de iluminación incidente en una superficie tiene en la reflectancia de la misma, conocido como BRDF (Wilson y Meyers, 2007).

La temperatura radiométrica de la superficie del dosel (LST) se medirá de manera continua con un sensor radiométrico en el infrarrojo Apogee SI-111, que posee un semi-ángulo de visión de 22°, ubicado a la misma altura del conjunto de sensores de radiación y dirigido hacia el dosel vegetal en un ángulo de 60°. Las mediciones de cada minuto de LST serán agregadas en promedios de media hora para armonizarlos con el resto de las mediciones de covarianza turbulenta e índices ópticos de verdor y su distribución se realizará tanto a través de la página de la RUOA como del repositorio de datos continentales Ameriflux, como se ha descrito anteriormente.

### **3. Grupo técnico de trabajo**

#### **Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático de la UNAM**

Michel Grutter de la Mora, Wolfgang Stremme, María de la Luz Espinoza Fuentes, Óscar Peralta Rosales, Rocío García, Alejandro Bezanilla, Rodolfo Sosa Echeverría, Elizabeth Vega Rangel, Pablo Sánchez (esta lista puede crecer)

#### **Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos, UNAM**

Luis Ladino Moreno, Eugenia González del Castillo y todo el equipo técnico de la RUOA

#### **Agencia Espacial Mexicana (AEM), SCT**

Adán Salazar Garibay, Edilberto Hernández García

#### **Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), SEMARNAT**

Claudia Alejandra Octaviano Villasana, José Abraham Ortíz Álvarez, Juana Itzchel Nieto Ruiz, Roberto Basdaldud Cruz

#### **Universidad Autónoma del Carmen, Facultad de Química**

Julia Griselda Cerón Bretón, Rosa María Cerón Bretón

#### **Depto. Ciencias de la Sustentabilidad, el Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR)**

Alejandro Cueva Rodríguez

#### **Reserva de la Biósfera de Calakmul, CONANP**

Carlos Enrique Coutiño Cal y Mayor

### **4. Avances en la adquisición del equipo instrumental, accesorios y contenedores**

#### **a. Contenedor marítimo modificado**

La compra del contenedor que va a albergar los equipos ya ha sido realizada y actualmente la empresa está haciendo las adecuaciones. Lo primero fue encontrar un proveedor que cuente con las capacidades de realizar las modificaciones y adecuaciones requeridas y con experiencia en proyectos similares. Se contrató la empresa Imagina Creativos Espacios S.A. de C.V. porque demostró tener las capacidades técnicas, el profesionalismo y haber realizado adecuaciones para aplicaciones altamente especializadas como las que se solicitaron para este proyecto. Se tomaron en cuenta elementos importantes como a) la resistencia en los

acabados y selección de materiales apropiados par resistir condiciones adversas, b) climatización y control de los parámetros ambientales, como es la humedad y la temperatura al interior del contenedor y c) seguridad, practicidad y optimización de los trabajos requeridos.

El contenedor marítimo que se adquirió es de un solo uso (*one-way*) y la adecuación considera la fabricación de una puerta de acceso de personas, el corte del techo y la colocación de una base para la instalación del rastreador solar y domo, la inclusión de *inlets* para tomas de muestra de algunos instrumentos, la base y colocación de un sistema de aire acondicionado tipo *mini-split*, la colocación de una lámina en la parte inferior del contenedor y un barandal en la parte superior, y al techo se le aplicará un impermeabilizante con antiderrapante. Todo el exterior del contenedor recibirá 4 manos de *primer* y 4 de pintura esmalte para la protección contra corrosión.

Por dentro del contenedor, se colocan bastidores en las paredes, un aislamiento de 3 pulgadas y un acabado de *Lainer* panel para mantener el interior del contenedor lo mejor aislado térmicamente y hermético posible. Se instalará un piso de pvc de alto tránsito y una instalación eléctrica que incluye un centro de carga, contactos e iluminación. La figura 2 muestra a grandes rasgos cuál va a ser el diseño y la distribución de los equipos dentro de este Laboratorio Móvil. No hay una fecha definitiva de entrega pero actualmente se está interactuando con la empresa para definir algunos aspectos técnicos de los trabajos que ya se están realizando.

#### **b. Espectrómetro infrarrojo Bruker IFS 125/HR**

El instrumento, cuyas especificaciones y fotografías se muestran en la tabla 1, ya ha sido pedido al fabricante Bruker Optilk GmbH en Alemania. Se trata de un pedido personalizado de alta especialización, en donde se tuvieron que definir la geometría y configuración de medición, los componentes ópticos y de detección según nuestras necesidades para cumplir con los objetivos dentro de este proyecto. En particular, en este proceso fue necesario tomar en cuenta las especificaciones establecidas por la red TCCON para poder cumplir con los requerimientos técnicos de las observaciones propuestas y los altos niveles de calidad requeridos. Igual, no se tiene fecha específica de entrega pero esperamos que sea a finales del 2022. Para entonces, será importante tener el contenedor listo ya que un técnico de Bruker vendrá a México a instalar el instrumento y hacer las pruebas y proceso de alineación que son necesarias para asegurar un óptimo funcionamiento.

#### **c. Analizador Picarro G2401**

Aún no se ha realizado la compra de este instrumento. Dependiendo de la suficiencia presupuestal, se discutirá con los coordinadores de la Red Universitaria de Observatorios

Atmosféricos (RUOA) la posibilidad de comprar o utilizar uno existente de alguna de las otras estaciones de la red. Ya también se iniciaron los trámites para hacer la adquisición de los gases de calibración con certificado internacional de calidad otorgados por la NOAA.

#### **d. Estación meteorológica**

Con recursos complementarios, ya se inició con el proceso de compra de algunos de los componentes y sensores para armar una estación meteorológica tal cual opera la RUOA. Próximamente se realizarán las adquisiciones de los componentes faltantes y algunos sensores adicionales que se van a implementar para esta estación en particular, como son radiómetros de diferentes características y sensores de propiedades de suelo. También ya se está viendo lo de la compra de la torre para la técnica de covarianza turbulenta y balance de energía que se usará para determinar los flujos, pero no se concretará hasta conocer el sitio definitivo para poder definir la altura requerida.

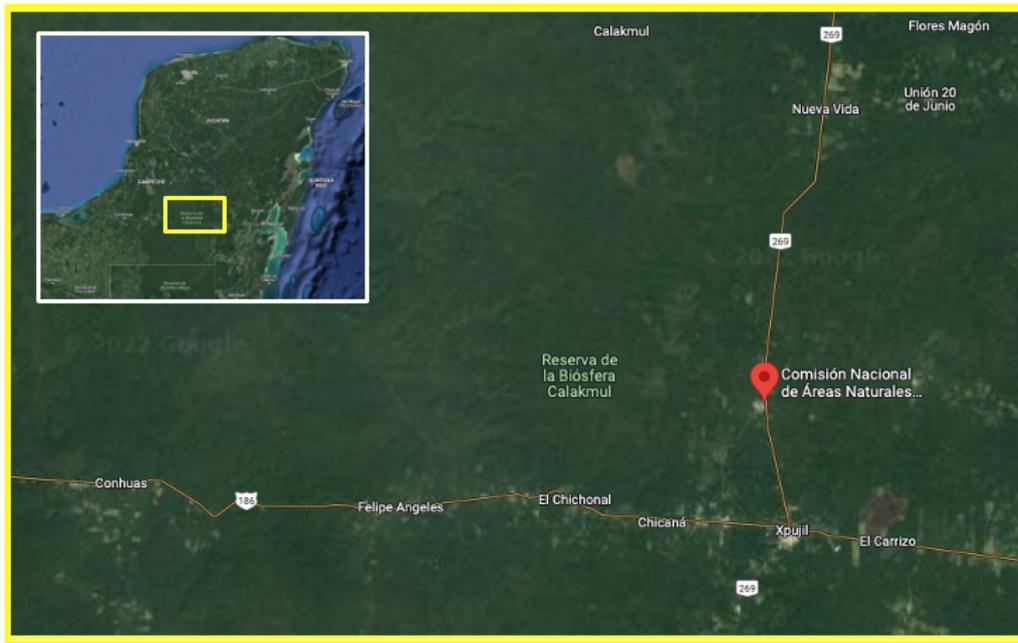
### **5. Consideraciones adicionales**

#### **a. Selección del sitio**

Aún no se ha definido un sitio en específico para la colocación del OMECCA, pero ya se han iniciado las conversaciones y el análisis de opciones con el personal de la CONANP (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas) en la Reserva de la Biósfera de Calakmul. Los criterios a tomar en cuenta es que el lugar cuente con las condiciones de seguridad necesarias para salvaguardar la integridad de los equipos, la posibilidad de hacer una acometida de luz eléctrica (independientemente si se decide instalar paneles solares para respaldar el suministro de energía), y la posibilidad de establecer conexión vía internet con la estación. El tema de la conectividad se puede resolver de varias maneras, pero es un punto a tener en cuenta.

Existen varios campamentos con instalaciones de la CONANP tanto dentro como fuera de la reserva, como en los poblados de X-Canah y de Once de Mayo al norte y sur de la reserva, respectivamente, que cuentan con energía eléctrica pero la conectividad o la red celular es prácticamente inexistente. También una posibilidad es el Museo de Naturaleza y Arqueología de Calakmul, ubicado en el Km 20 yendo hacia la zona arqueológica, pero a este lugar no llega la red de luz eléctrica por lo que se complicaría demasiado la operación de OMECCA. Finalmente, se consideraron las oficinas de CONANP tanto en Xpujil como en Zoh Laguna. El primero está junto a la carretera de Chetumal a Escárcega por lo que, junto con el área urbana, causarían demasiadas interferencias a las mediciones.

Lo que hasta ahora se ve como una opción viable, es un predio de CONANP en el poblado de Zoh Laguna, a 10 kms al norte de Xpujil, que son dos hectáreas cercadas que cuenta con algunas edificaciones, está cercado y tiene vigilancia, cuenta con luz eléctrica y posibilidad de contratar un servicio de internet. Además hay una torre de comunicaciones que se pudiera emplear para la instalación de algunos sensores. En el mapa de la figura 11 se muestra esta posible ubicación del observatorio.



**Figura 11.** Sitio probable para la localización del OMECCA, en la localidad de Zoh Laguna, Campeche. Aquí se encuentra un predio con oficinas e instalaciones pertenecientes a la CONANP, que cuenta con las condiciones de seguridad, luz eléctrica y conectividad que requiere el observatorio.

Para la selección del sitio definitivo será, sin embargo, hacer una visita para documentar las diferentes opciones y tomar una decisión en conjunto con el comité técnico del proyecto.

### **b. Participación internacional**

Ya se han anunciado los planes de establecer este sitio para la validación de datos satelitales en varios foros internacionales, lo cual ha sido recibido con buenos ojos por colegas de la comunidad científica. Se hizo por ejemplo una presentación al respecto en la reunión anual de la misión TEMPO, celebrada virtualmente el 31 de mayo, y en la reunión anual de la red TCCON, que se llevó a cabo igual de manera virtual los días 21 al 23 de junio ambos del presente año.

### **c. Sigüientes pasos**

Además de continuar con los procesos de adquisición de materiales y equipos que se van a necesitar para echar a andar OMECCA, se pretende hacer una visita a Campeche en agosto o

septiembre para seguir explorando los sitios y empezar a hacer los preparativos para la colocación del laboratorio móvil. Una vez recibamos el contenedor en el Instituto en Ciudad Universitaria, empezaremos a trabajar en las adecuaciones finales y a empezar a instalar algunos equipos y sistemas de control y automatización, como por ejemplo el domo sobre el techo. También iniciaremos con la difusión del proyecto para atraer colaboraciones de otras instituciones y tener una mayor participación de académicos que trabajan en líneas de investigación que pudieran complementar los trabajos y alcances que se han propuesto originalmente.

## Bibliografía

- Aubinet M, A Grelle, A Ibrom, U Rannik, J Moncrieff, T Foken, AS Kowalski, PH Martin, P Berbigier, C Bernhofer, R Clement, J Elbergs, A granier, T Grünwald, K Morgenstern, K Pilegaard, C Rebmann, W Snijders, R Valentini, T Vesala. 2000. Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests: the EUROFLUX methodology. *Advances in Ecological Research* 30: 113-175.
- Atkinson R, "Atmospheric chemistry of VOCs and NOx," *Atmospheric Environment*, vol. 34, no. 12-14, pp. 2063–2101, 2000.
- Atkinson R and Arey J, "Atmospheric degradation of volatile organic compounds," *Chemical Reviews*, vol. 103, no. 12, pp. 4605–4638, 2003.
- Baldocchi DD. 2020. How eddy covariance flux measurements have contributed to our understanding of Global Change Biology. *Global Change Biology* 26: 246:260.
- Bravo AH, Soto AR, Sosa ER, Sánchez AP, Alarcón JAL, Kahl J, Ruíz BJ. 2006. Effect of acid rain on building material of the El Tajín archaeological zone in Veracruz, Mexico. *Environmental Pollution* 144: 655-660.
- Cede A, Tiefengraber M, Gebetsberger M, Kreuter A. 2019. Fiducial reference measurements for air quality: TN on PGN products "correct use" guidelines, version 1. LuftBlick. Innsbruck, Austria. Disponible en: [https://www.pandonia-global-network.org/wp-content/uploads/2020/01/LuftBlick\\_FRM4AQ\\_PGNUserGuidelines\\_RP\\_2019009\\_v1.pdf](https://www.pandonia-global-network.org/wp-content/uploads/2020/01/LuftBlick_FRM4AQ_PGNUserGuidelines_RP_2019009_v1.pdf)
- Chapin III FS, Matson PA, HA Mooney. 2002. Principles of terrestrial ecosystem ecology. Springer-Verlag. New York.
- Edwards P. M., C. J. Young, K. Aikin et al., "Ozone photochemistry in an oil and natural gas extraction region during winter: simulations of a snow-free season in the Uintah Basin, Utah," *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 13, no. 17, pp. 8955–8971, 2013.
- Etchevers JD, Monreal CM, Hidalgo C, Acosta M, Padilla J, López RM. 2005. Manual para la determinación de carbono en la parte aérea y subterránea de sistemas de producción en

laderas. Colegio de Postgraduados. México. 29 p.

- Goulden ML, Munger WJ, Fan SM, Daule BC, Wofsy S. 1996. Measurements of carbon sequestration by long-term eddy covariance: methods and a critical evaluation of accuracy. *Global Change Biology* 2: 69-182.
- Heiri O, Lotter AF, Lemcke G. 2001. Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results. *Journal of Paleolimnology* 25: 101–110.
- Hyun K. Ki, H. Yoon-Jung, and P. Raktim, "Investigation of carbonyl compounds in air from various industrial emission sources," *Chemosphere*, vol. 70, pp. 807–820, 2008.
- Knotková D, Kreislová K. 2007. Atmospheric corrosion and conservation of copper and bronze. WIT Press Publ. *Advances in Architecture*, Southampton, 107-142.
- Legge AH, Krupa SV. 1990. Acidic deposition. Lewis Publishers. Chelsea, MI, United States.
- Lu K. D., F. Rohrer, F. Holland et al., "Observation and modelling of OH and HO<sub>2</sub> concentrations in the Pearl River Delta 2006: a missing OH source in a VOC rich atmosphere," *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 12, no. 3, pp. 1541–1569, 2012.
- Mendoza-Cruz LH, Trujeque JR, López TP, Recio DA, Owen PQ, Cruz RO. 2014. Evaluation of Atmospheric Corrosion of Two Bells from Campeche's Cultural Heritage. *MRS Online Proceedings Library Archive*, 1618, 217-225.
- Mylavarapu R, Kennelley E. 2002. UF/IFAS Extension Soil Testing Laboratory (ESTL) Analytical Procedures and Training Manual. Circular 1248/SS312, 9/2002. EDIS 2002 (5).
- NOM-021-RECNAT-2000. 2002. Norma Oficial Mexicana que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación. 31 de diciembre de 2002. NADP 2017. The National Atmospheric Deposition Program. <http://nadp.isws.illinois.edu/educ/>
- Parungo, F., Nagamoto, C., Hoyt, S., & Bravo, A. H. (1990). The investigation of air quality and acid rain over the Gulf of Mexico. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, 24(1), 109-123.
- PGN (Pandonia Global Network): Pandonia data archive. Disponible en: <http://data.pandonia-global-network.org/>
- Rao Z, Chen Z, H. Liang, L. Huang, and D. Huang, "Carbonyl compounds over urban Beijing: concentrations on haze and non-haze days and effects on radical chemistry," *Atmospheric Environment*, vol. 124, pp. 207–216, 2016.
- Shi G, Chen Z, Teng J, Li Y. 2015. Spatio-temporal variation of total mercury in precipitation in the largest industrial base in China: impacts of meteorological factors and anthropogenic activities. *Tellus B*, 67.
- Soil Survey Staff. 2014. *Keys to Soil Taxonomy*, 12a ed. USDA-Natural Resources Conservation Service. Washington DC.
- Sosa-Echeverría R, Bravo-Álvarez H, Alarcón-Jimenez AL, Torres -Barrera MC, Jaimes-Palomera M, Sánchez-Álvarez P, Granados-Hernández E. 2018. Acid rain in a Mexican site on the coast of the Gulf of Mexico. *Atmósfera* 31: 317-330.
- Stavrakou T, J.-F. Müller, J. Peeters et al., "Satellite evidence for a large source of formic acid from

- boreal and tropical forests,” *Nature Geoscience*, vol. 5, no. 1, pp. 26–30, 2012.
- Stull RB. 1988. *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, The Netherlands.
- Sullivan TJ, Driscoll CT, Gherini SA, Munson RK, Cook RB, Charles DF, Yatsko CP. 1989. Influence of aqueous aluminium and organic acids on measurement of acid neutralizing capacity in surface waters. *Nature* 338: 408–410.
- Swinbank WC. 1951. The measurement of vertical transfer of heat and water vapour by eddies in the lower atmosphere. *Journal of Meteorology* 8: 135-145.
- US-EPA (2016). United States for Environmental Protection Agency. <http://www.epa.gov/scram>.
- US,EPA (1999). “Compendium method TO-11a determination of formaldehyde in ambient air using adsorbent cartridge followed by high performance liquid chromatography (HPLC),” *Compendium of Methods for the Determination of Toxic Organic Compounds in Ambient Air Second Edition*, U. S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH, USA, 1999, Active Sampling Methodology. Method Optimization of TO-11A. <https://www.epa.gov>
- Webb EK, GI Pearman, R Leuning. 1980. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 106: 85-100.
- Wilson TB, Meyers TP. 2007. Determining vegetation indices from solar and photosynthetically active radiation fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology* 144: 160-179.
- WMO. World Meteorological Organization. 2004. Allan, MA. *Manual for the GAW Precipitation Chemistry Programme: Guidelines, Data Quality Objectives and Standard Operating Procedures*. No. WMO-TD-1251. Ginebra, Suiza.
- Yver-Kwok C et al. 2021. Evaluation and optimization of ICOS atmosphere station data as part of the labeling process. *Atmospheric Measurement Techniques* 14: 89–116.