

# BASE DE DATOS DE FLUJOS VERTICALES DE DIOXIDO DE CARBONO EN ECOSISTEMAS TERRESTRES Y COSTEROS EN MÉXICO

## DATABASE OF VERTICAL CARBON DIOXIDE FLUXES AT TERRESTRIAL AND COASTAL ECOSYSTEMS IN MEXICO

Josué Delgado-Balbuena<sup>1,2</sup>, Enrico A. Yépez<sup>1†</sup>, Fernando Paz-Pellat<sup>2,3</sup>, Gregorio Ángeles-Pérez<sup>3,4</sup>, Carlos Aguirre-Gutiérrez<sup>5,6</sup>, María Susana Alvarado-Barrientos<sup>7</sup>, Tulio Arredondo<sup>6</sup>, Fernando Ayala-Niño<sup>8,9</sup>, Stephen H. Bullock<sup>5</sup>, Alejandro E. Castellanos<sup>10</sup>, Alejandro Cueva<sup>5,11</sup>, Bernardo Figueroa-Espinoza<sup>12</sup>, Jaime Garatuza-Payán<sup>1</sup>, Eugenia González-del Castillo<sup>13</sup>, Enrique González-Sosa<sup>14</sup>, Aurelio Guevara-Escobar<sup>15</sup>, César Hinojo-Hinojo<sup>10</sup>, Paw U. Kyaw-Tha<sup>16</sup>, Carlos Lizárraga-Celaya<sup>17</sup>, Yolanda Maya-Delgado<sup>8</sup>, Walter Oechel<sup>18</sup>, Eli R. Pérez-Ruiz<sup>19</sup>, Mauricio Quesada-Avedaño<sup>20</sup>, Carlos A. Robles-Zazueta<sup>10,21</sup>, Julio C. Rodríguez<sup>22</sup>, Nidia E. Rojas-Robles<sup>1</sup>, Tonantzin Tarin-Terrazas<sup>1,23</sup>, Enrique Troyo-Diéguez<sup>8</sup>, Jorge Uuh-Sonda<sup>12</sup>, Martha L. Vargas-Terminel<sup>1</sup>, Rodrigo Vargas<sup>23</sup>, Masuly G. Vega-Puga<sup>1,10</sup>, Vivian S. Verduzco<sup>1</sup>, Enrique R. Vivoni<sup>19,24</sup> y Christopher J. Watts<sup>17</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ciencias del Agua y Medio Ambiente, Instituto Tecnológico de Sonora, Ciudad Obregón, Sonora, México.

<sup>2</sup> Programa Mexicano del Carbono, Texcoco, Estado de México, México.

<sup>3</sup> Colegio de Postgraduados, Montecillos, Estado de México, México.

<sup>4</sup> Posgrado en Ciencias Forestales, Colegio de Postgraduados, Montecillos, Estado de México, México.

<sup>5</sup> Departamento de Biología de la Conservación, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. Ensenada, Baja California, México.

<sup>6</sup> División de Ciencias Ambientales, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A. C. San Luis Potosí, México.

<sup>7</sup> Ecología Funcional, Instituto de Ecología A. C., Xalapa, Veracruz, México.

<sup>8</sup> Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S. C., La Paz, Baja California Sur, México.

<sup>9</sup> Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Saltillo, Ramos Arizpe Coahuila, México.

<sup>10</sup> Departamento de Investigaciones Científicas Tecnológicas, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México.

<sup>11</sup> Biosphere 2, School of Natural Resources and the Environment and BIO5 Institute, University of Arizona, Arizona USA.

<sup>12</sup> Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Sisal, Yucatán, México.

<sup>13</sup> Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.

<sup>14</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México.

<sup>15</sup> Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México.

<sup>16</sup> Department of Land, Air and Water Resources, University of California, Davis, CA, USA.

<sup>17</sup> Departamento de Física, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México.

<sup>18</sup> Global Change Research Group, Department of Biology, San Diego State University, San Diego, CA, USA.

<sup>19</sup> School of Earth and Space Exploration, Arizona State University, Tempe, AZ, USA.

<sup>20</sup> Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad, UNAM, Morelia, Michoacán, México.

<sup>21</sup> Division of Plant and Crop Sciences, University of Nottingham, Sutton Bonington, Leicestershire, UK.

<sup>22</sup> Departamento de Agricultura y Ganadería, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México.

<sup>23</sup> Department of Plant and Soil Sciences, University of Delaware, Newark, DE, USA.

<sup>24</sup> School of Sustainable Engineering and the Built Environment, Arizona State University, Tempe, AZ, USA.

† Autor para correspondencia: yepezglz@gmail.com

### RESUMEN

El dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) es uno de los principales gases de efecto invernadero (GEI) cuyo incremento en la atmósfera está asociado con el calentamiento global. Con el objetivo de promover estudios de síntesis que lleven a un mejor entendimiento de los procesos relacionados con el ciclo del carbono en ecosistemas terrestres y costeros de México, se construyeron bases de datos de flujos verticales de carbono. Se construyó una base de

datos con flujos de CO<sub>2</sub> a escala anual, para ocho sitios y 30 años por sitio, de la red MexFlux, cuya información se obtuvo de publicaciones en revistas científicas, memorias de resúmenes en extenso y documentos de tesis. Una segunda base se construyó a partir de datos a escala diaria, de los flujos de CO<sub>2</sub> de 14 sitios de monitoreo y 53 años/sitio, que fueron proporcionados directamente por los investigadores principales (PI) de cada sitio y denominada MexFlux\_2019 V1. Esta última base de datos, a diferencia de la primera que es de libre acceso, está restringida. Las bases de datos incluyen información del intercambio neto de carbono a nivel ecosistema, la productividad primaria bruta, respiración del ecosistema y de variables meteorológicas y ambientales complementarias.

**Palabras clave:** dióxido de carbono; covarianza de vórtices; MexFlux; productividad primaria bruta; respiración del ecosistema.

## ABSTRACT

Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) is one of the main greenhouse gases (GHG) which is related with the global warming. In order to promote synthesis studies, and to achieve a better understanding of the carbon cycle in terrestrial and coastal ecosystems in México, databases of vertical carbon fluxes were created. One database holds published results of CO<sub>2</sub> fluxes in scientific journals, extended abstracts, and dissertation documents at annual time scale of 8 sites and 30 years/site of MexFlux. A second database named MexFlux\_2019 V1 holds unpublished data directly contributed by principal investigators (PI) of 14 sites and 53 years/site at daily time scale. This database is of restricted access. Databases hold data of net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange, gross primary productivity, ecosystem respiration and ancillary meteorological and environmental variables.

**Key words:** carbon dioxide; eddy covariance; MexFlux; gross primary productivity; ecosystem respiration.

## INTRODUCCIÓN

El dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) es uno de los principales gases de efecto invernadero (GEI) que más se ha incrementado en la atmósfera desde finales del siglo XIX. Actualmente su concentración media global supera las 400 ppm como producto de la quema de combustibles fósiles, la producción de cemento y el cambio de uso de suelo (Friedlingstein *et al.*, 2010). El aumento del CO<sub>2</sub> y otros GEI (*i.e.* metano y óxido nitroso) están relacionados con el incremento de cerca de 1 °C en la temperatura media del planeta, si se toman como referencia las concentraciones y temperaturas preindustriales (entre 1850 y 1900; Allen *et al.*, 2018); sin embargo, esta temperatura podría incrementarse hasta en 4 °C hacia finales de este siglo si no se llevan a cabo políticas de reducción de emisiones de GEI y de crecimiento poblacional (Modelo RCP8.5, Riahi *et al.* 2011).

Los ecosistemas terrestres son capaces de remover hasta 120 Gt de carbono (C) a través del proceso de fotosíntesis, pero al mismo tiempo, devuelven cerca del 95% del C que se captura por procesos de

respiración de la vegetación y del suelo (Chapin *et al.*, 2011). La magnitud de las fluctuaciones en la concentración global de CO<sub>2</sub> generado por el desfase de los procesos de fotosíntesis y respiración son equiparables a las emisiones de CO<sub>2</sub> derivado de las actividades antropogénicas (Zhang *et al.*, 2007). Sin embargo, debido a las diferencias en las condiciones climatológicas y en las características de los tipos de vegetación, la capacidad de captura y emisión de CO<sub>2</sub> difiere temporal y espacialmente entre los ecosistemas (Luyssaert *et al.*, 2007). Por lo tanto, para conocer el potencial como sumidero o fuente de C de los ecosistemas, es importante contar con mediciones de los flujos de C a diferentes escalas temporales y espaciales en condiciones climáticas contrastantes. Además, es importante integrar y promover estudios de síntesis sobre los flujos de carbono y energía que provean una visión más general de los procesos continentales a una escala espacial y temporal más amplia (ej. a escala regional y País).

En la actualidad, el método más ampliamente usado para la medición de los flujos de CO<sub>2</sub> entre la superficie y la atmósfera, a nivel ecosistema es el método de

covarianza de vórtices (*eddy covariance* en inglés; Baldocchi, 2008). Este método tiene la ventaja de ser poco invasivo y de aportar mediciones de los flujos verticales en alta resolución temporal (desde medias horas) y continuas por largos periodos de tiempo (de días a años). La resolución espacial con este método, aunque depende de las condiciones atmosféricas, va de decenas de metros cuadrados hasta varias hectáreas de representación. Esta característica permite que se obtenga una buena medición promedio del flujo de CO<sub>2</sub> de todos los componentes y de la variabilidad estructural en el ecosistema.

El consorcio MexFlux (Vargas *et al.*, 2013; Vargas *et al.*, 2012) está integrado por varios sitios

de medición en diferentes ecosistemas de México que usan el sistema de covarianza de vórtices para medir el intercambio de CO<sub>2</sub> y energía entre la biósfera y la atmósfera (Figura 1). Este consorcio tiene entre sus principales objetivos, conocer cuánto CO<sub>2</sub> asimilan o emiten los diferentes ecosistemas de México, así como entender los mecanismos ambientales y bióticos que controlan las tasas de captura y emisión de C (Vargas *et al.*, 2013). En este artículo se describen las bases de datos sobre flujos de C en ecosistemas terrestres y costeros de México con información proporcionada por los investigadores principales de cada sitio de monitoreo, que a su vez son miembros del consorcio MexFlux.



Figura 1. Localización de los sitios de monitoreo de flujos de CO<sub>2</sub> y energía que forman parte del consorcio MexFlux (estrellas), las estrellas negras indican los sitios que aportaron datos para las bases de datos descritas y las estrellas blancas indican otros sitios activos o desmontados en proceso de incorporar datos a MexFlux.

## Materiales y Métodos

### Método de covarianza de vórtices

De manera general, el método de covarianza de vórtices permite medir el intercambio de gases traza entre la biósfera y la atmósfera (Baldocchi, 2014). La técnica de covarianza de vórtices determina la

diferencia neta de masa y energía que se mueve hacia arriba y hacia abajo, a través del movimiento turbulento en la atmósfera (Figura 2). El flujo de CO<sub>2</sub>, vapor de agua o energía, es proporcional al promedio de la densidad del aire, la velocidad vertical del aire y la proporción de la mezcla de CO<sub>2</sub>, sobre un intervalo de tiempo dado (*i.e.* media hora) de la covarianza entre las fluctuaciones de la velocidad vertical del viento ( $w'$ ) y



la razón de mezcla del gas en cuestión ( $c'$ ; Baldocchi, 2003; Eq. 1); como en el caso del  $\text{CO}_2$ ,  $c = \rho_a / \rho_c$ , donde  $\rho_a$  y  $\rho_c$  son la densidad del aire y la densidad del  $\text{CO}_2$ , respectivamente. Entonces, el flujo de  $\text{CO}_2$  se calcula como:

$$F = \overline{\rho_a} \cdot \overline{w'c'} \quad (1)$$

donde la barra superior indica un promedio de tiempo y la comilla indica fluctuaciones alrededor del promedio (i.e.  $c' = c - \bar{c}$ ).

Para desarrollar esta técnica, se necesita contar con datos de alta frecuencia (10-20 Hz) de velocidad del viento y concentración de  $\text{CO}_2$ , vapor de agua y temperatura, pero los datos de flujo se calculan comúnmente en intervalos de media hora.

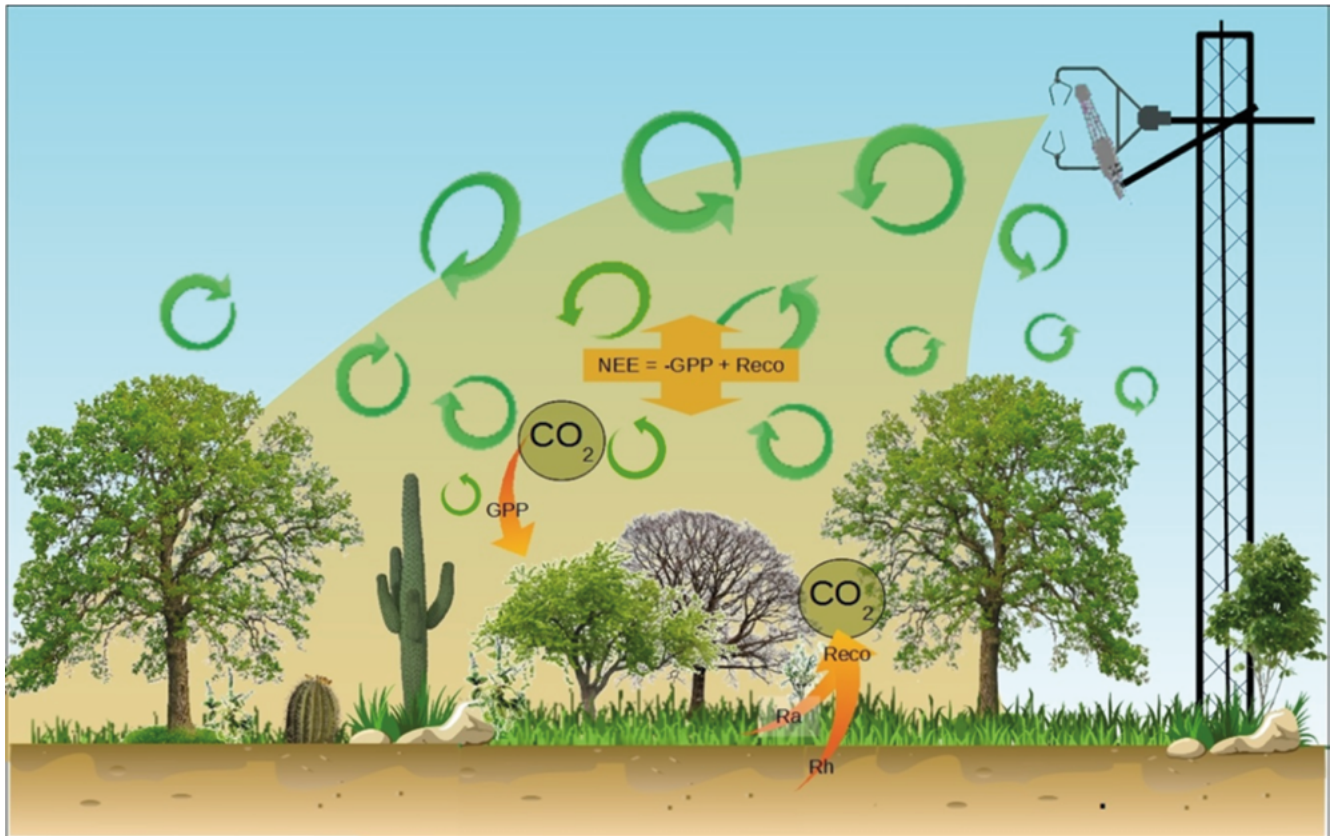
Respecto a los datos de flujo de carbono, con el método de covarianza de vórtices se calcula el intercambio de C a nivel ecosistema (NEE, por sus siglas en inglés). El NEE es el balance entre la productividad

primaria bruta (GPP, por sus siglas en inglés) y la respiración del ecosistema (Reco; Ecuación 2). La GPP es el C capturado por las plantas a través del proceso de fotosíntesis; mientras que la Reco es la suma de la respiración autotrófica (Ra), es decir la proveniente de raíces, micorrizas asociadas y tallos u hojas de las plantas; la respiración heterotrófica (Rh), la respiración proveniente de microorganismos heterótrofos del suelo y, de la micro y mesofauna (Chapin *et al.*, 2011; Nieder y Benbi, 2008). La relación del intercambio de C a nivel ecosistema está definida por:

$$\text{NEE} = -\text{GPP} + \text{Reco} \quad (2)$$

donde el signo negativo indica flujo neto de C de la atmósfera hacia el ecosistema; es decir, captura de C por parte del ecosistema. La respiración del ecosistema está dada por:

$$\text{Reco} = \text{Ra} + \text{Rh} \quad (3)$$



**Figura 2. Método de covarianza de vórtices.**

Este método mide el intercambio de energía y  $\text{CO}_2$  a nivel ecosistema (NEE por sus siglas en inglés), el cual es el balance entre la productividad primaria bruta (GPP, por sus siglas en inglés) y la respiración del ecosistema (Reco). La respiración del ecosistema es la suma de la respiración de la micro y mesofauna del suelo (respiración heterotrófica, Rh) y la respiración de las plantas y micorrizas asociadas (respiración autotrófica, Ra).

## Procesamiento de datos

Todos los flujos de CO<sub>2</sub> y vapor de agua se obtuvieron a través del procesamiento estándar aceptado de datos de covarianza de vórtices (Aubinet *et al.*, 2012) que incluye la eliminación de picos dentro de las series de tiempo de alta frecuencia (Vickers y Mahrt, 1997), corrección de retrasos entre señales del analizador de gases y el anemómetro, corrección de fluctuaciones de la densidad del aire (corrección WPL, Webb *et al.*, 1980) y correcciones espectrales de alta y baja frecuencia (Massman, 2000; Moncrief *et al.*, 2004). La velocidad de fricción ( $u^*$ ) fue el parámetro usado para identificar los periodos nocturnos con desarrollo de turbulencia insuficiente (Reichstein *et al.*, 2005), con excepción del sitio Chamela en el cual la escala de intensidad de turbulencia se usó para identificar los periodos ideales de desarrollo de turbulencias (González-del Castillo *et al.*, 2018). En todos los sitios se utilizaron analizadores de gases de ruta abierta (*i.e.* Li-7500A, Li-Cor, Lincoln, NE, EUA).

Los faltantes de datos en las series de tiempo (*gap filling*) se solventaron con el algoritmo de muestreo de distribución marginal (MDS, Reichstein *et al.*, 2005) mediante la herramienta en línea del Instituto Max Planck (<https://www.bgc-jena.mpg.de/REddyProc/brew/REddyProc.rhtml>) o con el paquete ReddyProc para R (Department for Biogeochemical Integration at MPI-BGC, Jena, Germany). Para la partición del intercambio neto de carbono en sus componentes, productividad bruta del ecosistema (GEP) y respiración del ecosistema (Reco), tal que  $-NEE \sim NEP = GEP + Reco$ , se usó el método de Reichstein *et al.* (2005) y Lasslop *et al.* (2010). En el sitio Chamela la respiración del ecosistema durante la noche se estimó a través de regresiones lineales entre la temperatura y la humedad del suelo. Los modelos de regresión se usaron para llenar los flujos de C nocturnos faltantes y, para modelar los flujos de respiración durante el día, para de esta forma separar los componentes del intercambio neto de C (respiración y productividad primaria bruta; González del Castillo *et al.*, 2018).

Como medidas de calidad de datos post-proceso, se utilizaron parámetros de estabilidad, estacionariedad, formación y desarrollo de turbulencias, presencia de precipitación y límites racionales de magnitud de los flujos (Foken y Wichura, 1996). Como una medida de verificación de la técnica, se utilizó el balance de energía:

$$R_n = LE + H + G + S \quad (4)$$

donde  $R_n$  es la radiación neta medida con radiómetros, generalmente, de cuatro componentes (*i.e.* CNR4 de Kipp & Zonen, Delft, The Netherlands); LE y H son el flujo de calor latente y calor sensible, respectivamente, ambos medidos con el sistema de covarianza de vórtices. G es el flujo de calor en el suelo y S es el almacenamiento de calor.

Como contexto, un cierre del balance de energía de 100%, donde la suma de calor latente y calor sensible medidos con el método de covarianza de vórtices, más los flujos de calor y almacenamiento en el suelo, iguales a la radiación neta, indicaría la medición perfecta de los flujos de calor y, por tanto, la de los flujos de C por el sistema de covarianza de vórtices. El promedio del balance de energía para los sitios reportados en el Cuadro 1 es de 0.76, el cual es similar al promedio reportado para los sitios del consorcio internacional FluxNet (balance de energía = 0.8, Wilson *et al.*, 2002), lo cual indica que hay subestimación de los flujos de calor latente y/o sensible, o una imprecisa medición de los demás almacenes o flujos de energía (Foken *et al.*, 2012).

## Integración de las Bases de Datos

Se hizo la separación de las bases de datos en una base libre y otra de acceso restringido: 1) la base libre incluye datos publicados en artículos científicos, tesis y memorias en extenso; 2) la base restringida incluye datos no publicados de flujos de C que fueron facilitados por los investigadores responsables de cada sitio. Otra de las diferencias entre las bases de datos consiste en que la base libre incluye solo flujos de C a escala anual, mientras que la base restringida incluye datos de balances de C a escala de día, en unidades de  $g\ C\ m^{-2}\ d^{-1}$ .

Existe también la base de datos disponibles en AmeriFlux del sitio de La Paz con ciertas restricciones para su uso, las cuales se detallan en el sitio que resguarda dichos datos (<http://ameriflux.lbl.gov/>).

## Recolección de datos públicos

Se usaron sumas anuales de los flujos de C y vapor de agua a nivel ecosistema, los cuales se obtuvieron de mediciones de alta frecuencia con el método de covarianza de vórtices. Sólo se consideraron ecosistemas naturales terrestres y costeros de México, de fuentes que reportaran el balance de C de al menos un año. Dentro

de las fuentes de información se incluyeron artículos científicos arbitrados, trabajos de tesis y resúmenes en extenso de las síntesis del Programa Mexicano del Carbono (Cuadro 1). Además, para el sitio de La Paz se usaron flujos de medias horas obtenidos del repositorio de flujos de C de AmeriFlux.

### Recopilación de datos restringidos

Para esta síntesis se usaron sumas diarias de flujos de CO<sub>2</sub> a nivel ecosistema, los cuales se obtuvieron de mediciones de alta frecuencia con el método de covarianza de vórtices. Los datos fueron obtenidos a través del contacto directo con los investigadores responsables de los sitios y únicamente los datos del sitio La Paz fueron obtenidos a través del repositorio de flujos de carbono de AmeriFlux (<http://ameriflux.lbl.gov/>).

### Complementación de datos climatológicos

Al igual que en el caso de los datos de flujos de CO<sub>2</sub>, en las series de tiempo que corresponden a datos meteorológicos como temperatura del aire y precipitación, existen vacíos causados principalmente por mal funcionamiento de los equipos o fallas de energía en las estaciones. Los faltantes de información en las variables de temperatura y precipitación fueron cubiertos con datos obtenidos de la red de estaciones climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) actualizado al año 2016. Se obtuvo información de la estación climatológica más cercana a cada sitio. Para cubrir los vacíos de radiación neta, velocidad del viento, contenido de humedad del suelo y demás variables no disponibles en las estaciones del SMN, se utilizaron datos de modelos de reanálisis atmosférico global, específicamente de ERA-Interim (Dee *et al.*, 2011), descargados del sitio del Centro Europeo para la Predicción del Clima de Medio-Rango (ECMWF) a través de la API de Python<sup>MR</sup> (Python Software Foundation).

### Evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>)

Se complementó la base de datos con la inclusión de la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>), la cual se calculó con base en tres métodos: el método de Hamon (Hamon, 1961), de Hargreaves (Hargreaves y Samani, 1985) y de Penman-Monteith (Penman, 1948). Se usaron las siguientes ecuaciones:

#### 1.- Hargreaves

$$E_{to} = 0.0023 * (T_{med} + 17.78)R_o * (T_{max} - T_{min})^{0.5} \quad (5)$$

donde,  $E_{to}$  = Evapotranspiración potencial diaria en mm d<sup>-1</sup>,  $T_{med}$  = Temperatura media diaria en °C,  $R_o$  = Radiación extraterrestre mm d<sup>-1</sup>, ver  $\lambda$  y  $T_{max}$  = Temperatura máxima.

$$R_o = \frac{24 * 60}{\pi} G_{sc} * D_r [\omega_s \text{Sen}(\varphi) \text{Sen}(\delta) + \text{Cos}(\varphi) \text{Cos}(\delta) \text{Sen}(\omega_s)] / \lambda \quad (6)$$

donde,  $R_o$  = Radiación extraterrestre MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>,  $G_{sc}$  = Constante solar = 0.082 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>,  $D_r$  = Distancia relativa inversa Tierra-Sol,  $\omega_s$  = Ángulo de radiación a la puesta del sol,  $\varphi$  = Latitud (radianes),  $\delta$  = Declinación solar y  $\lambda$  = 2.45 MJ/kg Calor latente de vaporización (convertir W/m<sup>2</sup> a mm d<sup>-1</sup>).

$$D_r = 1 + 0.033 * \cos\left(\frac{2\pi}{365} DJ\right) \quad (7)$$

$$\delta = 0.409 * \text{Sen}\left(\frac{2\pi}{365} DJ - 1.39\right) \quad (8)$$

$$\omega s = \arcsin(-\tan(\varphi) \tan(\delta)) \tag{9}$$

donde,  $DJ$  = Son los días julianos.

## 2.- Hamon

$$Eto = KPEC * 0.165 * 216.7 * N * \left( \frac{es}{T+273.3} \right) \tag{10}$$

donde,  $Eto$  = Evapotranspiración de referencia  $\text{mm d}^{-1}$ ,  $N$  = Número de horas en el día en múltiplos de 12 horas,  $es$  = Presión de vapor a saturación (mb o hPa),  $T$  = Temperatura media diaria en  $^{\circ}\text{C}$  y  $KPEC$  = es el coeficiente de calibración, el cual se estableció en 1.3 para todos los sitios.

$$e_s = 6.108e^{\left(\frac{17.27T}{T+237.3}\right)} \tag{11}$$

$$N = \left(\frac{24}{\pi}\right) * \omega s / 12 \tag{12}$$

## 3.- Penman-Monteith

$$ET_o = \frac{0.408 \Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273.15} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1+0.34u_2)} \tag{13}$$

donde,  $R_n$  es la radiación neta ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ),  $G$  es el flujo de calor en el suelo ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ),  $\gamma$  es la constante psicrométrica ( $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) = 0.001628 (P/l),  $\Delta$  es la pendiente de la curva de la tensión de vapor saturado ( $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ),  $u_2$  es la velocidad del viento a 2 m de altura ( $\text{m s}^{-1}$ ) y  $u_z$  se estima de  $u_2$  como:

$$u_z = 4.87 u_2 / \ln(67.8z - 5.42) \tag{14}$$

donde,  $u_z$  es la velocidad del viento a la altura  $z$ .

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los ecosistemas que se representan son matorrales, pastizales y selvas caducifolias (Cuadro 1). La base de datos libres incluyó ocho sitios MexFlux y 30 años por sitio de información. El intervalo de temperatura media anual en los sitios fue de 17 a 25.5  $^{\circ}\text{C}$  y precipitación media anual de 182 a 650 mm.

Para la base de datos restringida, los ecosistemas considerados incluyeron 14 sitios de monitoreo con

mediciones realizadas entre 2004 y 2018 (Figura 3). Cuenta con cinco sitios de matorral (La Paz, El Mogor, La Colorada, Bernal y Rayón), un sitio de pastizal (Ojuelos), dos sitios de bosque tropical seco (Chamela y El Palmar), dos sitios de bosque subtropical seco (Álamos y Tesopaco), un bosque de encino (Sierra de Locos), un bosque templado (Atopixco) y dos sitios de manglar (Puerto Morelos y El Sargento). El intervalo de temperatura media anual en los sitios fue de 13 a 25.5  $^{\circ}\text{C}$  y precipitación media anual de 182 a 2050 mm (Cuadro 2).

**Cuadro 1. Sitios MexFlux con datos publicados a escala anual. Base de datos libre.**

Sitio	Tipo de ecosistema	Periodo	Altitud (msnm)	PMA (mm)	TMA ( $^{\circ}\text{C}$ )	Referencia
La Paz	Matorral sarcocaula	2002 - 2008	21	182	23.6	Bell <i>et al.</i> , 2012; Hastings <i>et al.</i> , 2005
El Mogor	Matorral esclerófilo	2008 - 2012	409	281	17	Aguirre-Gutiérrez, 2014* Villarreal <i>et al.</i> , 2016; Cueva-Rodríguez, 2017*

Continuación Cuadro 1...

Sitio	Tipo de ecosistema	Periodo	Altitud (msnm)	PMA (mm)	TMA (°C)	Referencia
Rayón	Matorral subtropical	2008 - 2012	632	481	21.4	Verduzco <i>et al.</i> , 2018
Ojuelos	Pastizal semiárido	2011 - 2016	2228	424	18	Delgado-Balbuena, 2016*
La Colorada	Pastizal inducido / Sabana	2012 - 2013	398	343.8	22.7	Hinojo-Hinojo <i>et al.</i> , 2016
Álamos	Selva caducifolia	2017	368	673.18	23.4	Rojas-Robles <i>et al.</i> , 2018*
Tesopaco	Selva caducifolia	2005 - 2008	426	647	24.3	Verduzco <i>et al.</i> , 2015
El Palmar	Selva caducifolia	2017	8	650	25.5	Uuh-Sonda <i>et al.</i> , 2018*

PMA = Precipitación media anual, TMA = Temperatura media anual.

\* Referencias que corresponden a documentos de tesis y memorias de congresos

**Cuadro 2. Descripción de sitios y periodos con disponibilidad de datos.**

Sitio	Tipo de ecosistema	Periodo	Años	Altitud (m)	PMA (mm)	TMA (°C)
La Paz	Matorral sarcocaulé	2002 - 2008	7	21	182	23.6
El Mogor	Matorral mediterráneo	2008 - 2012	3	409	281	17.0
Rayón	Matorral subtropical	2008 - 2012	5	632	524	21.4
Ojuelos	Pastizal semiárido	2011 - 2017	7	2228	424	18.0
La Colorada	Sabana /Pastizal inducido	2011 - 2013	3	398	343.8	22.7
Álamos	Selva caducifolia	2015 - 2017	3	368	673.18	23.4
Tesopaco	Selva caducifolia	2005 - 2008	4	426	647	24.3
El Palmar	Selva caducifolia	2017 - 2018	2	8	650	25.5
Chamela	Selva caducifolia	2007 - 2013	7	73	844	25.8
Atopixco	Bosque templado	2017 - 2018	1	2064	1534	13.5
Bernal	Matorral xerófilo	2017 - 2018	2	2050	550	16.7
Sierra de Locos	Bosque de encino	2010 - 2014	5	1314	496	18.9
El Sargento	Manglar	2014 - 2016	3	0	125	24.2
Puerto Morelos	Manglar	2017 - 2018	1	0	1105	27.0
Total (años/sitio)			53			

PMA = Precipitación media anual, TMA = Temperatura media anual.



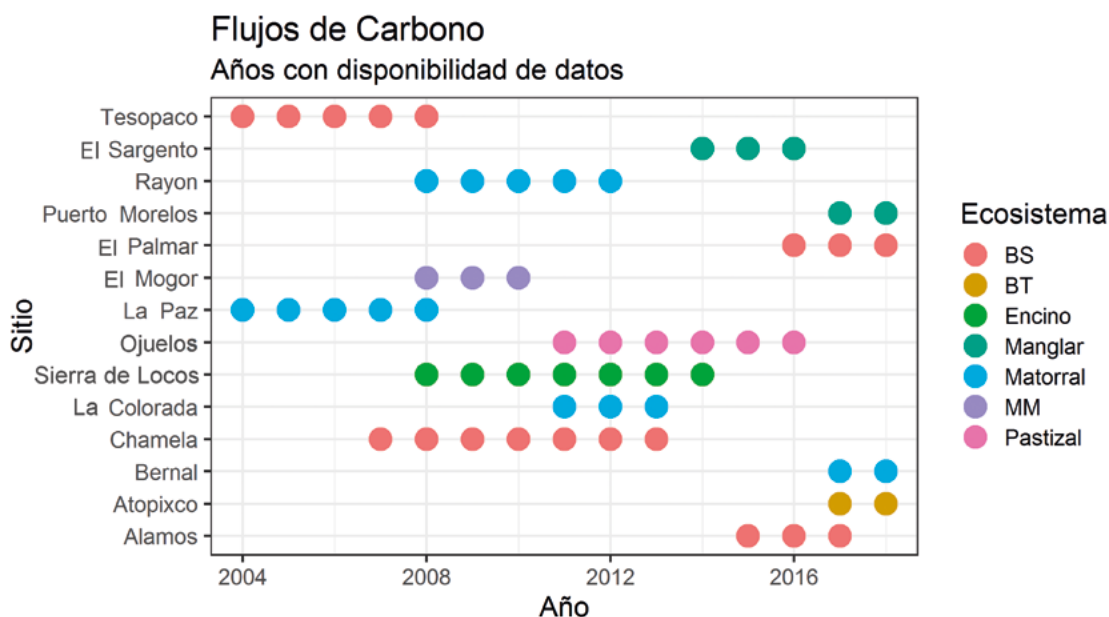


Figura 3. Representación temporal de la base de datos restringida por sitio y tipo de ecosistema.

### Características de las bases de datos resultantes

La base de datos libre contiene únicamente balances anuales de flujos de C (NEE, GPP y Reco), evapotranspiración y variables ambientales básicas como temperatura y precipitación (Cuadro 3).

Cuadro 3. Descripción de las variables contenidas en la base libre de flujos de carbono y agua.

Variable	Descripción	Unidades
Sitio	Nombre del sitio	--
Ecosistema	Tipo de ecosistema	--
NEE	Intercambio neto de carbono a nivel ecosistema	g C m <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup>
promedio NEE	Promedio de NEE de los años disponibles por sitio	g C m <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup>
GPP	Productividad primaria bruta del ecosistema	g C m <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup>
Reco	Respiración del ecosistema	g C m <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup>
PPT	Precipitación anual	mm
Promedio PPT	Promedio de la precipitación de los años disponibles por sitio	mm
ET	Evapotranspiración	mm
Year	Año	--
EB	Balance de energía	%
R <sup>2</sup> de EB	Coefficiente de correlación del balance de energía	--
Coordenadas	Coordenadas de ubicación	Grados decimales
Altitud (msnm)	Altitud del sitio	msnm
PMA	Precipitación media anual del sitio	mm
TMA	Temperatura media anual del sitio	°C
Observaciones		--
Referencia	Fuente de información	--

La base de datos restringida contiene las variables de flujos de C, vapor de agua y energía, además de variables meteorológicas y de suelo. En cada columna de las variables ambientales se indica si se midieron en el sitio o si obtuvieron de estaciones del SMN o de ERA-Interim (Cuadro 4). Para el cálculo de la

evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) se usaron, preferentemente, valores de temperatura, presión atmosférica y radiación medidos en el sitio. En caso de no contar con estas variables medidas, se utilizaron las de estaciones cercanas del SMN y, en último caso, se usaron los valores de ERA-Interim.

**Cuadro 4. Lista de variables disponibles en la base de datos.**

<b>Encabezado</b>	<b>Descripción de la variable</b>	<b>Unidades</b>
NEE	Intercambio neto de carbono a nivel ecosistema	g C m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>
GPP	Productividad primaria bruta	g C m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>
Reco	Respiración del ecosistema	g C m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>
ET	Evapotranspiración	mm d <sup>-1</sup>
LE	Flujo de calor latente	W m <sup>-2</sup>
H	Flujo de calor sensible	W m <sup>-2</sup>
PPT	Precipitación	mm d <sup>-1</sup>
Press	Presión atmosférica	hPa
RN	Radiación neta	W m <sup>-2</sup>
RH	Humedad relativa	%
VPD	Déficit de presión de vapor	kPa
Tair	Temperatura media del aire	°C
Tmin	Temperatura mínima del aire	°C
Tmax	Temperatura máxima del aire	°C
Tsoil	Temperatura del suelo a 5 cm de profundidad	°C
WS	Velocidad del viento	m s <sup>-1</sup>
WD	Dirección del viento	Grados
G	Flujo de calor en el suelo	W m <sup>-2</sup>
SWC	Contenido de agua en el suelo	v v <sup>-1</sup>
PPT_CNA_SMN	Precipitación	mm d <sup>-1</sup>
Tmean_CNA_SMN	Temperatura media del aire	°C
Tmax_CNA_SMN	Temperatura máxima del aire	°C
Tmin_CNA_SMN	Temperatura mínima del aire	°C
Dw_ERA	Punto de rocío	°C
RH_ERA	Humedad relativa	%
VPD	Déficit de presión de vapor	kPa
Tair_ERA	Temperatura media del aire	°C
Tmax_ERA	Temperatura máxima del aire	°C

Continuación Cuadro 4...

Encabezado	Descripción de la variable	Unidades
Tmin_ERA	Temperatura mínima del aire	°C
RN_ERA	Radiación neta	W m <sup>-2</sup>
WS_ERA	Velocidad del viento	m s <sup>-1</sup>
Tsoil_ERA	Temperatura del suelo	°C
SWC_ERA	Contenido de humedad en el suelo (15 cm)	v v <sup>-1</sup>
Press_ERA	Presión atmosférica	kPa
PPT_ERA	Precipitación	Mm
WS_2m	Velocidad a 2 m de altura (ver Eq. 10)	m s <sup>-1</sup>
Δ	Declinación solar	Rad
Ωs	Ángulo de radiación a la puesta del sol	Rad
Dr	Distancia relativa inversa Tierra-Sol	Rad
Ro	Radiación extraterrestre convertida en mm	mm d <sup>-1</sup>
es	Presión de vapor a saturación	hPa
N	Número de horas en el día en múltiplos de 12 horas	--
Δ slope	Pendiente de la curva de la tensión de vapor saturado	kPa °C <sup>-1</sup>
psychrometric constant (γ)	Constante psicrométrica	kPa °C <sup>-1</sup>
E	Presión de vapor	kPa
SR	Radiación solar de onda corta incidente	W m <sup>-2</sup>
Albedo	Albedo	--
Eto-Hargreaves	Evapotranspiración de referencia por el Método de Hargreaves	mm d <sup>-1</sup>
Eto-Hamon	Evapotranspiración de referencia por el Método de Hamon	mm d <sup>-1</sup>
Eto-Penman-Monteith	Evapotranspiración de referencia por el Método de Penman-Monteith	mm d <sup>-1</sup>

La terminación CNA\_SMN en el encabezado de cada variable indica que es obtenida de estaciones meteorológicas cercanas del SMN; mientras que la terminación ERA indica que fue obtenido de ERA-Interim.

En el Cuadro 5 se detalla la información de los investigadores responsables de cada sitio MexFlux.

Cuadro 5. Información de los investigadores responsables de cada sitio MexFlux.

Sitio	Investigador responsable	Adscripción
La Paz*	Walter Oechel / Yolanda Maya-Delgado	Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S. C.
El Mogor	Stephen H. Bullock	Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada

Sitio	Investigador responsable	Adscripción
Rayón	Christopher Watts/Julio Rodríguez	Universidad de Sonora
Ojuelos	J. Tulio Arredondo-Moreno	Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A. C.
La Colorada	Alejandro E. Castellanos	Universidad de Sonora
Álamos	Enrico A. Yépez	Instituto Tecnológico de Sonora
Tesopaco	Jaime Garatuza-Payán	Instituto Tecnológico de Sonora
El Palmar	Bernardo Figueroa	Universidad Nacional Autónoma de México
Chamela	Ma. Eugenia González-del Castillo	Universidad Nacional Autónoma de México
Atopixco	Gregorio Ángeles	Colegio de Postgraduados
Bernal	Enrique González-Sosa	Universidad Autónoma de Querétaro
Sierra de Locos	Enrique Vivoni / Julio C. Rodríguez	Arizona State University / Universidad de Sonora
El Sargento	Julio C. Rodríguez	Universidad de Sonora
Puerto Morelos	María Susana Alvarado	Instituto de Ecología A. C.

\*Disponible vía Ameriflux.

## SIGUIENTES PASOS

Con el fin de complementar la información sobre los flujos de CO<sub>2</sub>, se tiene como objetivo a corto plazo integrar información de sensores remotos a la base de datos. Tal información incluye índices de vegetación como NDVI (índice de vegetación diferencial normalizado) y productos como LAI (índice de área foliar) y GPP (productividad primaria bruta), además de otros índices de vegetación normalizada y floración desarrollados en México (IVSn e IVFF; Casiano y Paz, 2018). Esta información será a escala espacial de píxel de 250 m x 250 m e interpolada a escala temporal diaria. Además, como es imposible instrumentar todos los distintos tipos de ecosistemas existentes si se considera la heterogeneidad de los paisajes mexicanos, los siguientes pasos relacionados con vincular percepción remota con observaciones de campo, son muy importantes. Las bases de datos generadas por las torres de flujos pueden utilizarse para la validación y desarrollo de modelos y productos de percepción remota (es decir, los observatorios MexFlux generan “realidad sobre el terreno” para aplicaciones de teledetección). Así,

la información obtenida en algunas pocas áreas puede ser extendida e informar sobre los procesos a mayores escalas.

### Relevancia de la base de datos de flujos de carbono para México y en las redes internacionales

México cuenta con una gran diversidad de ecosistemas terrestres que van, desde la vegetación de dunas y manglares en las costas, hasta las selvas altas en el sur de la República. Esta gran diversidad de ecosistemas se debe, en gran parte, a aspectos orográficos y atmosféricos que generan una compleja climatología en el territorio mexicano (Pineda-Martínez *et al.*, 2007). Los climas cálidos y secos de las planicies costeras del norte contrastan con los cálidos y húmedos del suroeste y, los templados y secos de la altiplanicie central, con los fríos y húmedos de las altas montañas del Eje Neovolcánico (Rzedowski, 2006). Sin embargo, en México dominan los climas secos con un componente estacional muy marcado en más de la mitad del territorio, con sólo un 15% de climas húmedos (García, 2003). Esta



alta heterogeneidad espacial de ecosistemas y regímenes climáticos, además de las diferentes prácticas de manejo a las que muchos ecosistemas están expuestos, impone un gran reto para la investigación de los ciclos biogeoquímicos y los flujos de energía.

El conocimiento actual de los flujos de materia y energía en ecosistemas mexicanos aún es escaso (Vargas *et al.*, 2012; Hayes *et al.*, 2018); sin embargo, después de más de 15 años de establecido el primer sitio de monitoreo de flujos de CO<sub>2</sub>, se cuenta con alrededor de 70 años/sitio de información, con sitios de monitoreo que cuentan con entre 0.5 y 10 años de datos continuos. La red incluye una parte importante de los ecosistemas terrestres de México, tales como ecosistemas áridos y semiáridos de pastizal (Aguirre-Gutiérrez, 2014; Delgado-Balbuena, 2016; Hastings *et al.*, 2012; Verduzco *et al.*, 2018), selvas bajas caducifolias (Rojas-Robles *et al.*, 2018; Uuh-Sonda *et al.*, 2018; González del Castillo *et al.*, 2018), sistemas forestales (Soriano-Luna, 2018) y agroforestales (Holwerda *et al.*, 2016), manglares (Alvarado y Hernández, 2017; Rodríguez *et al.*, 2017); pero además incluye ecosistemas marinos (Reimer *et al.*, 2013; Barreras y Sánchez-Mejía, 2018), interfase tierra-costa (Gutiérrez-Loza y Ocampo-Torres, 2016). La amplia representación de ecosistemas hace especialmente importante a MexFlux, ya que muchos de estos ecosistemas se encuentran subrepresentados en las redes internacionales de monitoreo de flujos de gases de efecto invernadero (*i.e.* FluxNet; Baldocchi, 2008); además, a nivel nacional puede generar datos con valor agregado que permite ir más allá de los inventarios nacionales para entender la dinámica espacio-temporal en la captura y los almacenes de carbono.

Este conocimiento puede abstraerse para construir modelos computarizados que, a su vez, pueden ser adecuadamente parametrizados con datos medidos en campo con el fin de recrear los procesos y, de esta manera, examinar hipótesis de funcionamiento ecosistémico y realizar experimentos virtuales de pronóstico del efecto de distintos disturbios como sequías, cambio de uso de suelo y cambio climático (Baldocchi *et al.*, 2005; Richardson *et al.*, 2012; Méndez-Barroso *et al.*, 2014; Verduzco *et al.*, 2018). El potencial de la información y conocimiento generado por MexFlux constituye un soporte enorme para la implementación de políticas públicas relacionadas a la reducción de emisiones por cambio de uso del suelo como REDD+ (Gibbs *et al.*, 2007) y la gestión integrada de recursos hídricos (Méndez-Barroso *et al.*, 2004).

A pesar de que en esta primera base de datos

únicamente se incluyan 54 años/sitios de información de 14 de 20 sitios registrados en MexFlux, significa un gran avance tanto para la consolidación de una red de investigación, como para la generación de conocimiento y entendimiento de los procesos ecosistémicos que determinan el balance de C en México. Así mismo, existen grupos de trabajo enfocados específicamente a comprender la variabilidad y los factores de control de balance de energía y agua de importantes ecosistemas de México dentro de MexFlux (Holwerda *et al.*, 2016), cuyo enfoque a la vez, representa un área de oportunidad para crecer el entendimiento del funcionamiento de los ecosistemas mexicanos.

Por otra parte, la progresiva liberación de los datos de flujos de CO<sub>2</sub> y otros flujos por parte de los investigadores, ya sea debido al cumplimiento de las políticas de publicación de datos de las principales revistas científicas o, de las políticas de uso de datos de las diferentes redes de monitoreo de GEI, proporcionará un impulso mayor al conocimiento del ciclo del C en México y sus interacciones. Esto no sólo será benéfico para los mismos investigadores al extender sus redes de colaboración y proyección internacional (Dai *et al.*, 2018); si no que esta información de alta calidad podría también usarse por tomadores de decisiones.

## CONCLUSIONES

Se creó la base de datos de flujos de carbono y energía de 14 sitios de monitoreo en siete tipos de ecosistemas terrestres y costeros de México. Se construyeron dos bases de datos, la primera con balances de carbono ya publicados en revistas internacionales, artículos en extenso de congresos y en documentos de tesis. Esta base de datos contiene los balances de carbono de ocho sitios con 30 años/sitio de información a escala anual. La segunda base de datos incluye información a escala diaria de los balances de carbono de 14 sitios con 53 años/sitios de información. Debido a que esta base de datos cuenta con información inédita proporcionada de forma directa por los investigadores, se designó como restringida, pero a la cual puede accederse siguiendo los lineamientos del “Acuerdo para el acceso y uso de bases de datos y conocimiento del Programa Mexicano del Carbono y Socios”. La calidad de los datos cubre los estándares internacionales, por lo cual está disponible para una intercomparación de ecosistemas semejantes y para la modelación a diversas escalas. Para actualizar versiones nuevas de la base de datos es necesario crear un programa nacional que sustente el desarrollo de la

red, de los sitios de observación y del conocimiento de las interacciones de los flujos de carbono a escala nacional, continental y global.

## BASE DE DATOS

En seguimiento a la política del Programa Mexicano del Carbono de libre acceso a las bases de datos asociadas al ciclo del carbono y sus interacciones, así como en soporte de las síntesis nacionales del ciclo del carbono en ecosistemas terrestres y acuáticos, la base de datos de este trabajo está disponible en [http://pmcarbono.org/pmc/bases\\_datos/](http://pmcarbono.org/pmc/bases_datos/).

## Reglas del uso compartido de datos

Las reglas para compartir datos se especifican en el documento “Acuerdo para el acceso y uso de bases de datos y conocimiento del Programa Mexicano del Carbono y Socios”, bajo las “Condiciones de uso de las bases de datos y conocimiento”. Este documento se encuentra disponible en: [http://pmcarbono.org/pmc/bases\\_datos/](http://pmcarbono.org/pmc/bases_datos/). Como reglas básicas, los solicitantes deberán llenar el formato de solicitud definiendo el uso que se pretende dar a los datos. El Programa Mexicano del Carbono enviará la petición al propietario/poseedor de la base de datos para que acuerde dar acceso o no al solicitante, ya sea con solo citar la base de datos o coautoría de artículos basados en la información (o cualquier esquema que se defina por acuerdo entre las partes). Si el propietario/poseedor autoriza el acceso, los datos correspondientes de la versión actual de la base de datos, denominada MexFlux\_2019 V1, será enviada o se abrirá el acceso para su descarga.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece el financiamiento del Programa Mexicano del Carbono para la realización de la Base de datos MexFlux\_2019 V1. Así mismo, se agradece a los investigadores principales y sus grupos de investigación, por su disposición a compartir la información primaria y datos de sus sitios.

## LITERATURA CITADA

Aguirre-Gutiérrez, C. 2014. Variabilidad estacional e interanual en la producción primaria bruta y evapotranspiración en un ecosistema de clima mediterráneo en Baja California. Tesis de Maestría. CICESE. Baja California Norte, México. 56 p.

- Alvarado, S. y H. A. Hernández. 2017. Primeros resultados del monitoreo de flujos de calor, agua y carbono de un manglar en la costa norte de Quintana Roo. Memorias de la Reunión Anual de Unión Geofísica Mexicana. Puerto Vallarta, Jalisco, México del 22 al 27 de octubre.
- Aubinet M., T. Vesala and D. Papale (eds.). 2012. Eddy Covariance: a practical guide to measurement and data analysis. Springer. Netherlands. 438 p. DOI:10.1007/978-94-007-2351-1
- Baldocchi, D. D. 2003. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. *Global Change Biology* 9:479-492.
- Baldocchi, D. 2008. Breathing of the terrestrial biosphere: lessons learned from a global network of carbon dioxide flux measurement systems. *Australian Journal of Botany* 56:1-26.
- Baldocchi, D. 2014. Measuring fluxes of trace gases and energy between ecosystems and the atmosphere—the state and future of the eddy covariance method. *Global Change Biology* 20:3600-3609.
- Baldocchi, D., T. A. Black, P. S. Curtis, E. Falge, J. D. Fuentes, A. Granier, L. Gu, A. Knohl, K. Pilegaard, H. P. Schmid, R. Valentini, K. Wilson, S. Wofsy, L. Xu and S. Yamamoto. 2005. Predicting the onset of net carbon uptake by deciduous forests with soil temperature and climate data: a synthesis of FLUXNET data. *International Journal of Biometeorology* 49:377-387.
- Barreras, A. and Z. M. Sánchez-Mejía. 2018. Eddy Covariance observations of semiarid seagrasses from the Gulf of California. AGU Fall Meeting 2018. Washington, D. C., 10-14 December.
- Barrios, A. C. 2017. Evapotranspiración de un cafetal bajo sombra: separando la contribución del estrato de cafetos y árboles con el método de Eddy Covarianza. Tesis de Maestría. Posgrado en Ciencias de la Tierra. Centro de Ciencias de la Atmósfera. UNAM. CDMX, México.
- Bell, T. W., O. Menzer, E. Troyo-Diéguez and W. C. Oechel. 2012. Carbon dioxide exchange over multiple temporal scales in an arid shrub ecosystem near La Paz, Baja California Sur, Mexico. *Global Change Biology* 18:2570-2582.
- Casiano, M. y F. Paz. 2018. Índice espectral de vegetación para la caracterización simultánea de la floración y crecimiento vegetal. *Terra Latinoamericana* 36:169-181.
- Chapin III, F. S., P. A. Matson and P. M. Vitousek. 2011. Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology. Springer-Verlag New York. New York. 529 p.
- Cueva-Rodríguez, A. 2017. Biophysical controls of ecosystem fluxes of carbon in a semiarid Mediterranean shrubland. Tesis de Doctorado. CICESE. Baja California Norte, México. 82 p.
- Dai, S. Q., H. Li, J. Xiong, J. Ma, H.-Q. Guo, X. Xiao and B. Zhao. 2018. Assessing the Extent and Impact of Online Data Sharing in Eddy Covariance Flux Research. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 123:129-137.
- Dee, D. P., S. M. Uppala, A. J. Simmons, P. Berrisford, P. Poli, S. Kobayashi, U. Andrae, M. A. Balmaseda, G. Balsamo, P. Bauer, P. Bechtold, A. C. M. Beljaars, L. Van de Berg, J. Bidlot, N. Bormann,

- C. Delsol, R. Dragani, M. Fuentes, A. J. Geer, L. Haimberger, S. B. Healy, H. Hersbach, E. V. Hölm, L. Isaksen, P. Kållberg, M. Köhler, M. Matricardi, A. P. McNally, B. M. Monge-Sanz, J. J. Morcrette, B.-K. Park, C. Peubey, P. de Rosnay, C. Tavalato, J. N. Thépaut and F. Vitart. 2011. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 137:553-597.
- Delgado-Balbuena, J. 2016. Variability of carbon fluxes at different time-scales and their biotic and environmental controls on a short-grass steppe in Central Mexico. Tesis de Doctorado. IPICYT. San Luis Potosí, México.
- Foken, T. and B. Wichura. 1996. Tools for quality assessment of surface-based flux measurements. *Agricultural and Forest Meteorology* 78:83-105.
- Foken, T., R. Leuning, S. R. Oncley, M. Mauder and M. Aubinet. 2012. Corrections and Data Quality Control pp. 85-131. *In: Aubinet M., T. Vesala and D. Papale (eds.). Eddy Covariance: A Practical Guide to Measurement and Data Analysis.* Springer Netherlands.
- Friedlingstein, P., R. A. Houghton, G. Marland, J. Hackler, T. A. Boden, T. J. Conway, J. G. Canadell, M. R. Raupach, P. Ciais, and C. Le Quére. 2010. Update on CO<sub>2</sub> emissions. *Nature Geoscience* 3:811-812.
- García, E. 2003. Distribución de la precipitación en la República Mexicana. *Boletín del Instituto de Geografía. UNAM* 50:67-76.
- Gibbs, H. K., S. Brown, J. O. Niles and J. A. Foley. 2007. Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks: making REDD a reality. *Environmental Research Letters* 2(4):1-13 p. DOI: 10.1088/1748-9326/2/4/045023.
- González-del Castillo, E. G., P. U. Kyaw-Tha and A. Sánchez-Azofeifa. 2018. Turbulence scales for eddy covariance quality control over a tropical dry forest in complex terrain. *Agricultural and Forest Meteorology* 249:390-406.
- Gutiérrez-Loza, L. and F. J. Ocampo-Torres. 2016. Air-sea CO<sub>2</sub> fluxes measured by eddy covariance in a coastal station in Baja California, México. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 35. DOI: 10.1088/1755-1315/35/1/012012.
- Hamon, W. R. 1961. Estimating Potential Evapotranspiration. *Journal of the Hydraulics Division* 87:107-120.
- Hargreaves, G. H. and Z. A. Samani. 1985. Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. *Applied Engineering in Agriculture* 1:96-99.
- Hastings, A., G. Bramley, N. Bailey and D. Watkins. 2012. Serving deprived communities in a recession. Project Report. Joseph Rowntree Foundation, York, UK.
- Hastings, S. J., W. C. Oechel and A. Muhlia-Melo. 2005. Diurnal, seasonal and annual variation in the net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange of a desert shrub community (*Sarcocaulis*) in Baja California, Mexico. *Global Change Biology* 11:927-939.
- Hayes, D. J., R. Vargas, S. R. Alin, R. T. Conant, L. R. Hutyrá, A. R. Jacobson, W. A. Kurz, S. Liu, A. D. McGuire, B. Poulter and C. W. Woodall. 2018. pp. 71-108. *In: Cavallaro, N., G. Shrestha, R. Birdsey, M. A. Mayes, R. G. Najjar, S. C. Reed, P. Romero-Lankao and Z. Zhu (eds.) Chapter 2: The North American carbon budget. Second State of the Carbon Cycle Report (SOCCR2): A Sustained Assessment Report.* U.S. Global Change Research Program, Washington, D.C., U.S.A.
- Hinojo-Hinojo, C., A. E. Castellanos, J. C. Rodríguez, J. Delgado-Balbuena, J. R. Romo-León, H. Celaya-Michel, and T. E. Huxman. 2016. Carbon and water fluxes in an exotic buffelgrass savanna. *Rangeland Ecology and Management* 69:334-341.
- Holwerda, F., M. S. Alvarado-Barrientos and T. M. González-Martínez. 2016. Surface energy exchange in a tropical montane cloud forest environment: Flux partitioning, and seasonal and land cover-related variations. *Agricultural and Forest Meteorology* 228-229:13-28.
- Lasslop, G., M. Reichstein, D. Papale, A. D. Richardson, A. Arneeth, A. Barr, P. Stoy and G. Wohlfahrt. 2010. Separation of net ecosystem exchange into assimilation and respiration using a light response curve approach: critical issues and global evaluation. *Global Change Biology* 16:187-208.
- Luyssaert, S., I. Inglima, M. Jung, A. D. Richardson, M. Reichstein, D. Papale, S. L. Piao, E.-D. Schulze, L. Wingate, G. Matteucci, L. Aragao, M. Aubinet, C. Beer, C. Bernhofer, K. G. Black, D. Bonal, J.-M. Bonnefond, J. Chambers, P. Ciais, B. Cook, K. J. Davis, A. J. Dolman, B. Gielen, M. Goulden, J. Grace, A. Granier, A. Grelle, T. Griffis, T. Grünwald, G. Guidolotti, P. J. Hanson, R. Harding, D. Y. Hollinger, L. R. Hutyrá, P. Kolari, B. Kruijt, W. Kutsch, F. Lagergren, T. Laurila, B. E. Law, G. Le Maire, A. Lindroth, D. Loustau, Y. Malhi, J. Mateus, M. Migliavacca, L. Misson, L. Montagnani, J. Moncrieff, E. Moors, J. W. Munger, E. Nikinmaa, S. V. Ollinger, G. Pita, C. Rebmann, O. Roupsard, N. Saigusa, M. J. Sanz, G. Seufert, C. Sierra, M. L. Smith, J. Tang, R. Valentini, T. Vesala and I. A. Janssens. 2007. CO<sub>2</sub> balance of boreal, temperate, and tropical forests derived from a global database. *Global Change Biology* 13:2509-2537.
- Massman, W. J. 2000. A simple method for estimating frequency response corrections for eddy covariance systems. *Agricultural and Forest Meteorology* 104:185-198.
- Méndez-Barroso, L. A., E. R. Vivoni, A. Robles-Morua, G. Mascaro, E. A. Yépez, J. C. Rodríguez, ... and J. A. Saiz-Hernández. 2014. A modeling approach reveals differences in evapotranspiration and its partitioning in two semiarid ecosystems in Northwest Mexico. *Water Resources Research* 50:3229-3252.
- Moncrieff, J., R. Clement, J. Finnigan and T. Meyers. 2004. Averaging, detrending, and filtering of Eddy covariance time series. *Handbook of Micrometeorology* 29:7-31.
- Nieder, R. and D. K. Benbi. 2008. Carbon and Nitrogen in the Terrestrial Environment. Springer, Dordrecht, Netherlands. DOI:10.1007/978-1-4020-8433-1
- Penman, H. L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and physical sciences* 193:120-45.
- Pineda-Martínez, L. F., N. Carbajal and E. Medina-Roldán. 2007. Re-



- gionalization and classification of bioclimatic zones in the central-northeastern region of México using principal component analysis (PCA). *Atmosfera* 20:133-145.
- Reichstein, M., E. Falge, D. Baldocchi, D. Papale, M. Aubinet, P. Berbigier, C. Bernhofer, N. Buchmann, T. Gilmanov, A. Granier, T. Grünwald, K. Havránková, H. Ilvesniemi, D. Janous, A. Knohl, T. Laurila, A. Lohila, D. Loustau, G. Matteucci, T. Meyers, F. Miglietta, J. M. Ourcival, J. Pumpanen, S. Rambal, E. Rotenberg, M. Sanz, J. Tenhunen, G. Seufert, F. Vaccari, T. Vesala, D. Yakir and R. Valentini. 2005. On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm. *Global Change Biology* 11:1424-1439.
- Reimer, J. J., R. Vargas, S. V. Smith, R. Lara-Lara, G. Gaxiola-Castro, M. Hernández-Ayón, A. Castro, M. Escoto-Rodríguez and J. Martínez-Osuna. 2013. Air-sea CO<sub>2</sub> fluxes in the near-shore and intertidal zones influenced by the California Current. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 118:4795-4810.
- Riahi, K., S. Rao, V. Krey, C. Cho, V. Chirkov, G. Fischer, G. Kindermann, N. Nakicenovic and P. Rafaj. 2011. RCP 8.5-A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Climatic Change* 109:33-57.
- Richardson, A. D., R. S. Anderson, M. A. Arain, A. G. Barr, G. Bohrer, G. Chen, Y. Xue. 2012. Terrestrial biosphere models need better representation of vegetation phenology: results from the North American Carbon Program Site Synthesis. *Global Change Biology* 18:566-584.
- Rodríguez, A. H. C. 2017. Biophysical controls of ecosystem fluxes of carbon in a semiarid Mediterranean shrubland Tesis de Doctorado. CICESE. Ensenada, Baja California, México. 82 p.
- Rodríguez, J. C., C. Robles, M. L. Vargas-Terminel, A. E. Castellanos, E. Yépez, A. Meling, C. Watts y C. Hinojo-Hinojo. 2017. Intercambio neto de carbono en el manglar El Sargento, Sonora, México. *Memorias de la Reunión Anual de Unión Geofísica Mexicana*. Puerto Vallarta, Jalisco, México del 22 al 27 de octubre de 2017.
- Rojas-Robles, N. E., E. A. Yopez, J. Garatuzo-Payán y M. A. Rivera-Díaz. 2018. Productividad neta del ecosistema, sus componentes y evapotranspiración en un bosque tropical seco maduro en el Noroeste de México. pp. 61-68. *In: Paz, F., A. Velázquez y M. Rojo (eds.)*. Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2018. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono en colaboración con el Instituto Tecnológico de Sonora. Texcoco, Estado de México, México.
- Rzedowski, J. 2006. Vegetación de México. 1ra Edición. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. D.F., México.
- Uuh-Sonda J. M., B. Figueroa-Espinoza, M. P. Gómez-Nicolás, H. A. Gutiérrez-Jurado y L. A. Méndez-Barroso. 2018. Variación estacional de los flujos de carbono y agua sobre la selva baja caducifolia Yucateca en la Reserva Estatal "El Palmar". pp. 53-60. *In: Paz, F., A. Velázquez y M. Rojo (eds.)*. Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2018. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono en colaboración con el Instituto Tecnológico de Sonora. Texcoco, Estado de México, México.
- Soriano-Luna, M., G. Ángeles-Pérez, M. Guevara, R. Birdsey, Y. Pan, H. Vaquera-Huerta, J. R. Valdez-Lazalde, K. D. Johnson and R. Vargas. 2018. Determinants of Above-Ground Biomass and Its Spatial Variability in a Temperate Forest Managed for Timber Production. *Forests* 9:490.
- Vargas, R., E. A. Yépez, J. L. Andrade, G. Ángeles, T. Arredondo, A. E. Castellanos, J. Delgado-Balbuena, J. Garatuzo-Payan, E. González- del Castillo, W. Oechel, A. Sánchez-Azofeifa, E. Velasco, E. R. Vivoni and C. Watts. 2013. Progress and opportunities for monitoring greenhouse gases fluxes in mexican ecosystems: the mexflux network. *Atmósfera* 26:325-336.
- Vargas, R., H. W. Loescher, T. Arredondo, E. Huber-Sannwald, R. Lara-Lara and E. A. Yépez. 2012. Opportunities for advancing carbon cycle science in Mexico: toward a continental scale understanding. *Environmental Science and Policy* 21:84-93.
- Verduzco, V. S., E. R. Vivoni, E. A. Yépez, J. C. Rodríguez, C. J. Watts, T. Tarin, J. Garatuzo-Payán, A. Robles-Morua and V. Y. Ivanov. 2018. Climate Change Impacts on Net Ecosystem Productivity in a Subtropical Shrubland of Northwestern México. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 123:688-711.
- Verduzco, V. S., J. Garatuzo-Payán, E. A. Yépez, C. J. Watts, J. C. Rodríguez, A. Robles-Morua and E. R. Vivoni. 2015. Variations of net ecosystem production due to seasonal precipitation differences in a tropical dry forest of northwest Mexico. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 120:2081-2094.
- Vickers, D. and L. Mahrt. 1997. Quality Control and Flux Sampling Problems for Tower and Aircraft Data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 14:512-526.
- Villarreal, S., R. Vargas, E. A. Yopez, J. S. Acosta, A. Castro, M. Escoto-Rodríguez, E. Lopez, J. Martínez-Osuna, J. C. Rodríguez, S. V. Smith, E. R. Vivoni and C. J. Watts. 2016. Contrasting precipitation seasonality influences evapotranspiration dynamics in water-limited shrublands. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 121:494-508.
- Webb, E. K., G. I. Pearman and R. Leuning. 1980. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer, Q. J. R. Meteorol. Soc. 106:85-100.
- Wilson, K., A. Goldstein, E. Falge, M. Aubinet, D. Baldocchi, P. Berbigier, ... and A. Grelle. 2002. Energy balance closure at FLUXNET sites. *Agricultural and Forest Meteorology* 113:223-243.
- Zhang, L. H., Y. N. Chen, W. H. Li and R. F. Zhao. 2007. Seasonal variation of soil respiration under different land use/land cover in arid region. *Science in China, Series D: Earth Sciences* 50:76-85.