

MexFlux: SINERGIAS PARA DISEÑAR, EVALUAR E INFORMAR SOLUCIONES CLIMÁTICAS NATURALES

MexFlux: SYNERGIES TO DESIGN, EVALUATE AND INFORM NATURAL CLIMATE SOLUTIONS

Tonantzin Tarin-Terrazas^{1†}, Susana Alvarado-Barrientos², Alejandro Cueva-Rodríguez³, César Hinojo-Hinojo⁴, Eugenia González del Castillo⁵, Zulia Sánchez-Mejía⁶, Samuel Villarreal-Rodríguez⁷, Enrico A. Yépez-González⁶

¹ Instituto de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México, México City, México.

² Red de Ecología Funcional, Instituto de Ecología A.C., Xalapa, México.

³ Departamento de Ciencias de la Sustentabilidad, El Colegio de la Frontera Sur, Unidad Villahermosa.

⁴ School of Geographical Sciences and Urban Planning, Arizona State University, Tempe, AZ.

⁵ Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos, Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, UNAM, CDMX, México.

⁶ Departamento de Ciencias del Agua y Medio Ambiente, Instituto Tecnológico de Sonora, Ciudad Obregón, Sonora.

⁷ Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México.

† Autor de correspondencia: ttarin@iecologia.unam.mx

RESUMEN

México está comprometido a alcanzar cero emisiones netas de carbono y limitar el incremento de la temperatura media global a 1.5°C debido al cambio climático. Para lograrlo se ha planteado implementar programas de mitigación como Soluciones Climáticas Naturales (SCN) a través de la restauración, conservación o mejora en la gestión de los territorios para aumentar el almacenamiento de carbono en ecosistemas, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a la atmósfera y promover el enfriamiento radiativo. Para conocer el potencial de distintos ecosistemas (naturales o antropogénicos) como SCN y comprender cómo los ecosistemas responden al calentamiento global, se requieren observaciones de GEI, balances de carbono y energía, y cuantificación de procesos ecosistémicos como la productividad primaria y la evapotranspiración. Un sistema de monitoreo utilizando la técnica de *eddy covariance* (EC) permite obtener dichas observaciones al cuantificar directamente el intercambio de GEI y los flujos de energía entre la superficie terrestre y la atmósfera. Los productos generados por los observatorios que utilizan la técnica de EC, a mediano-largo plazo, generan conocimiento fundamental para avanzar en el desarrollo de programas de adaptación y mitigación en colaboración con las comunidades locales y regionales. Estos sistemas de monitoreo proveen información y conocimiento básico para evaluar y generar modelos de interés científico y práctico para enfrentar la crisis climática. Este trabajo presenta la importancia, los retos y limitaciones del monitoreo de ecosistemas a través de observatorios equipados con la técnica de EC que forman la Red Mexicana de Flujos Ecosistémicos (MexFlux). Se presentan también las oportunidades de crecimiento de MexFlux desde un enfoque de trabajo entre gobierno y comunidad científica para reducir los vacíos en el conocimiento de los ecosistemas mexicanos y generar información para transitar hacia el manejo sustentable de los territorios ante los retos del cambio global.

Palabras clave: gases de efecto invernadero; dióxido de carbono; cambio climático; adaptación; mitigación; MexFlux.

ABSTRACT

Mexico is committed to reaching zero net carbon emissions and thus limiting the increase in global average temperature to 1.5°C due to climate change. To achieve this, it has been suggested that it is necessary to implement Natural Climate Solutions (NCS) as mitigation strategies, through restoration, conservation or improvement of land and water management to increase carbon storage in ecosystems, reduce GHG emissions to the atmosphere, and to promote surface radiative cooling. To evaluate the potential of different ecosystems as NCS and to understand their response to global warming it is necessary to monitor their exchange of greenhouse gases (GHG) with the atmosphere, and to

quantify their carbon budgets and ecosystem processes such as primary productivity and evapotranspiration. A system using the eddy covariance (EC) technique directly quantifies the GHG exchange between the land surface and the atmosphere, as well as the components of the energy balance of ecosystems. The products generated from the continuous long-term monitoring of ecosystems with the EC technique contribute to assess the response of ecosystems to climate variability and advance the development of adaptation and mitigation programs with the collaboration of local and regional communities. Here, we present the significance, challenges and limitations of ecosystem monitoring through observatories equipped with the EC technique, that constitute the Mexican Network of Ecosystem Fluxes (MexFlux). Finally, we present the opportunities for the growth of MexFlux through a collaboration between the government and the scientific community to reduce the gaps in knowledge of Mexican ecosystems and generate relevant information to move towards the sustainable management of land and ecosystems in face of the challenges of global change.

Keywords: *greenhouse gas emissions; carbon dioxide; climate change; adaptation; mitigation; MexFlux.*

INTRODUCCIÓN

Las naciones alrededor del mundo se comprometieron a alcanzar cero emisiones netas de carbono para cumplir con el acuerdo de París que fue firmado en 2015. Esto fue replanteado nuevamente en la última reunión de Cambio Climático de la conferencia de las partes (COP) de COP26 llevada a cabo en Glasgow (<https://ukcop26.org/>). El acuerdo de París intentó comprometer a las naciones a limitar el incremento de la temperatura media global a 1.5°C, lo cual requiere una rápida descarbonización y remoción del CO₂ atmosférico para lograrlo (Hemes *et al.*, 2021). ¿Qué significa alcanzar cero emisiones netas de carbono? Esto quiere decir lograr que la atmósfera reciba menor o igual cantidad de gases efecto invernadero (GEI) del que puede asimilar la superficie de la Tierra. A pesar de todos los esfuerzos persisten brechas en cuanto a las condiciones financieras de los países, la contabilidad de emisiones netas de GEI y producción de combustibles fósiles. Las naciones no están actuando de manera eficiente para lograr frenar las emisiones de carbono y por lo tanto frenar el incremento en la temperatura media global.

A mediados del 2021, el Grupo Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) publicó el informe con las bases científicas de la física del cambio climático (<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>). El informe explica que los cambios en intensidad y frecuencia de eventos ambientales extremos como las olas de calor, inundaciones, sequías, y ciclones tropicales son debido a la influencia humana que ha generado un incremento de los GEI en la

atmósfera. Los GEI en promedio alcanzaron valores sin precedentes de 410 ppm para el dióxido de carbono (CO₂), 1866 ppb para el metano (CH₄) y 332 ppb para el óxido de nitrógeno (N₂O) en 2019 (IPCC, 2021). Uno de los señalamientos del IPCC es que la respuesta de los ecosistemas al cambio climático no está completamente incluida en los modelos de proyecciones climáticas, y hay un desconocimiento sobre cómo los ecosistemas se verán afectados por dichos eventos extremos, de tal modo que generar conocimiento acerca de la respuesta de los ecosistemas ante la variabilidad climática (p. ej., variabilidad estacional, anual, decadal) es de vital importancia y debe ser una prioridad para todas las naciones.

Una mejor comprensión de las posibles respuestas de los ecosistemas (en tiempo real o escenarios a futuro) es un componente central para avanzar en el desarrollo de programas de adaptación y mitigación frente a un entorno cambiante, debido al cambio climático. Avanzar en el conocimiento del funcionamiento de los ecosistemas requiere una mayor infraestructura y desarrollo científico para el monitoreo de los ecosistemas y la colaboración entre la comunidad académica y gobiernos de todos los niveles es imprescindible.

Institucionalmente, en México, el sistema de medición y monitoreo de emisiones GEI de los ecosistemas se basa en la combinación de un Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS) e información de cambios en la cobertura vegetal basado en productos satelitales de alta resolución (CONAFOR, 2020). Sin embargo, la información generada por este sistema presenta retos para estimar con baja incertidumbre

los flujos anuales de GEI por cambios en los cinco reservorios de carbono forestal considerados por el IPCC (p.ej., biomasa aérea y subterránea, mantillo, madera muerta, y carbono orgánico en el suelo), debido a la fuerte estacionalidad y su relación con diversos procesos de perturbación natural o antropogénica. Esta información es aún más limitada cuando se requiere de estimaciones a nivel sub-nacional o regional, las cuales además demandan implementación a escala local. Una aproximación para resolver estos retos es la selección de áreas para el monitoreo intensivo del carbono, en las cuales se puedan probar diferentes enfoques y herramientas para la medición detallada de la dinámica del carbono en distintas escalas de espacio y tiempo para que la información generada pueda relacionarse con procesos que ocurren a escala de paisaje o región (Birdsey *et al.*, 2013).

FUNCIONAMIENTO GENERAL DE LOS ECOSISTEMAS

Los ecosistemas terrestres, acuáticos, costeros, y marinos están moldeados por las diferentes condiciones climáticas que ocurren en todo el mundo (Chapin, 2002). Al mismo tiempo, los procesos de los ecosistemas son reguladores importantes de los sistemas climáticos a través del intercambio continuo de materia y energía entre la superficie del planeta y la atmósfera (Eamus *et al.*, 2006; Reichstein *et al.*, 2014; Wood *et al.*, 2008). Estas interacciones se identifican a través del estudio del balance de energía y de los flujos ecosistémicos, como el intercambio neto de carbono (NEE) y la evapotranspiración (ET; Figura 1). Tanto el clima como el funcionamiento de los ecosistemas responden a una variedad de procesos ambientales y antropogénicos, en una amplia gama de escalas espacio-temporales (Cubasch *et al.*, 2013). Por un lado, es importante poder predecir el impacto de un evento climático extremo en los flujos ecosistémicos y cómo ocurre la recuperación de las funciones ecosistémicas a diferentes escalas temporales (días, meses, años) y espaciales (parcela, paisaje, cuenca, regional). Esto requiere comprender los mecanismos que controlan el almacenamiento de carbono en el suelo y la vegetación, y las interacciones de estos reservorios con la atmósfera.

Los productores primarios (tanto terrestres como acuáticos/marinos) son el único componente de la biota capaz de asimilar el CO₂ de la atmósfera mediante la fotosíntesis (denominada producción primaria bruta

en los ecosistemas o GPP por sus siglas en inglés; Figura 1). Los productores primarios convierten el carbono inorgánico (CO₂) en carbono orgánico, que es asimilado y metabolizado por los organismos, y finalmente transportado, y almacenado como materia orgánica (es decir, madera, hojas, raíces, frutos, flores) que eventualmente se descompone y se almacena en los suelos. Los ecosistemas terrestres contribuyen con más del 50% de la fijación global de carbono (Le Quéré *et al.*, 2017). Por otro lado, el metabolismo de los microorganismos del suelo (respiración del suelo, R_{suelo}), y la respiración de la vegetación (R_{planta}) y de la fauna, devuelve grandes cantidades de carbono a la atmósfera (Bond-Lamberty *et al.*, 2018). Además, los productores primarios, específicamente la vegetación en los ecosistemas terrestres, juegan un papel muy importante en regresar grandes cantidades de agua a la atmósfera vía transpiración contribuyendo a la recirculación del agua, las precipitaciones locales, y al enfriamiento radiativo (Domínguez *et al.*, 2008; Ellison *et al.*, 2017; Jasechko *et al.*, 2013). Existen factores ambientales y antropogénicos, como el suministro de radiación solar, la disponibilidad de agua en el suelo, la disponibilidad de nutrientes, y el cambio de uso de suelo, que limitan la función de los productores primarios, o pueden incrementar procesos de descomposición y salidas de carbono del ecosistema hacia la atmósfera, y en consecuencia cambian las tasas de asimilación y almacenamiento de carbono en los ecosistemas. Estos factores también impactan el flujo de agua de los ecosistemas hacia la atmósfera, es decir, la evapotranspiración, un componente del ciclo hidrológico que incluye la transpiración e interceptación de la vegetación (T) y la evaporación del suelo (E; ver Fig. 1). De tal modo que, si ocurren cambios en la función y estructura de la vegetación, cambios ambientales o de uso de suelo, el balance o presupuesto de agua a escala local, regional o de cuenca, se ve afectado sustancialmente (Abbott *et al.*, 2019). Es por esto que generar conocimiento básico sobre los procesos que controlan los flujos ecosistémicos, como la GPP y ET, contribuirá a generar mejores inventarios de los reservorios de carbono, su vulnerabilidad o resiliencia ante la variabilidad climática, y contribuirá a informar la toma de decisiones en materia de manejo de los ecosistemas y distribución y aprovechamiento de los recursos naturales (p. ej., agua).

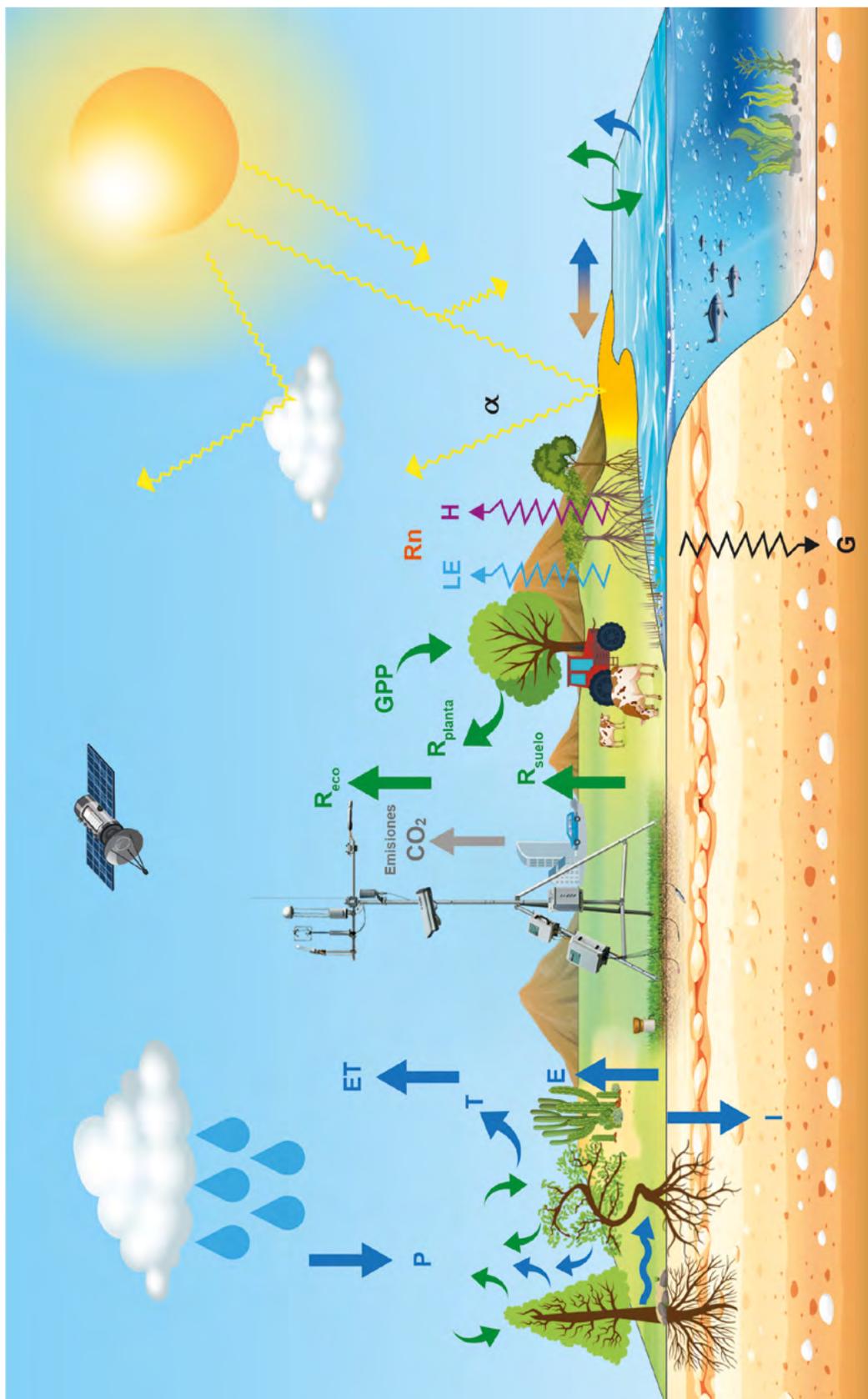


Figura 1. Balance de energía y flujos ecosistémicos de carbono y agua en ecosistemas terrestres, acuáticos, costeros y marinos. Las flechas azules representan los flujos del ciclo hidrológico: precipitación P, infiltración I, y evapotranspiración ET (que incluye E como evaporación del suelo y T como transpiración de la vegetación) y la escorrentía como flujo horizontal. Las flechas en verde corresponden a los flujos de carbono: respiración del ecosistema R_{eco} (que incluye respiración del suelo R_{suelo} , y respiración de la vegetación R_{planta}) y las entradas de carbono al ecosistema vía fotosíntesis o productividad primaria bruta (GPP, por sus siglas en inglés). Las flechas en zigzag representan componentes del balance de energía: flujo de calor sensible H, flujo de calor latente LE y radiación neta R_n . La flecha horizontal en el agua representa el intercambio de materia y energía entre el continente y el océano. La figura muestra una torre de eddy covariance (EC, en inglés) al centro para el monitoreo de los flujos ecosistémicos y las variables ambientales. Al fondo en la parte urbana se muestran con una flecha gris las emisiones por quema de combustibles fósiles por actividades antropogénicas.

El gobierno de México ha reconocido la necesidad de implementar medidas que reduzcan las emisiones de GEI para mitigar los efectos negativos del cambio climático y garantizar un futuro armónico y habitable (Plan Nacional de Desarrollo, 2019). Prueba de esto es el compromiso de México ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) para elaborar, actualizar, publicar, y facilitar inventarios nacionales sobre las emisiones antropogénicas y sumideros naturales de gases de efecto invernadero, mediante la implementación de metodologías comparables (Artículo 4, texto de la convención). El inventario nacional de emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero (INEGyCEI), que es elaborado por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) conforme al artículo 74 de la Ley General de Cambio Climático, considera las emisiones por quema de combustibles fósiles, producción y transmisión de energía, y actividades ganaderas como las principales fuentes de emisiones (INEGyCEI, 2015). Sin embargo, hay factores que no se incluyen en el inventario nacional de GEI de México que son cruciales para hacer un presupuesto exhaustivo de todas las fuentes y sumideros de carbono. Se reconoce, por ejemplo, que el cambio de uso de suelo que produce alteraciones drásticas a la cobertura vegetal, como la pérdida de cobertura boscosa, es una fuente importante de GEI (Aryal *et al.*, 2018) y de calentamiento radiativo (Pielke, 2005; Bonan, 2008; Alkama y Cescatti, 2016). Resulta entonces de suma importancia conservar y restaurar la cobertura vegetal para mantener su capacidad como sumidero de carbono (INEG y CEI, 2015) y su potencial de disipar energía reduciendo el calentamiento localmente (Ellison *et al.*, 2017). De este modo, es crucial destacar el papel que juegan los ecosistemas como sumideros de GEI y es precisamente el manejo sustentable de los territorios y los ecosistemas lo que puede ser una Solución Climática Natural (Baldocchi, 2014; Griscom *et al.*, 2017).

SOLUCIÓN CLIMÁTICA NATURAL Y MONITOREO DE ECOSISTEMAS

Una Solución Climática Natural (SCN) es cualquier acción de restauración, conservación o mejora en la gestión de la tierra y cuerpos de agua para incrementar el almacenamiento de carbono en ecosistemas, reducir las emisiones de GEI a la atmósfera y promover el enfriamiento radiativo (Griscom *et al.*, 2017). Una SCN incluye ecosistemas manejados y no manejados

y su implementación se puede desarrollar en escalas espaciales amplias y a largo plazo (Hemes *et al.*, 2021). Además, la implementación de una Solución Natural Climática puede involucrar la participación de las comunidades mexicanas en el manejo sostenible de sus ecosistemas, lo que a su vez puede generar incentivos de mercados de carbono que contribuyan al bienestar ambiental, social y económico de las mismas. Sin embargo, esto requiere de instalar la capacidad de monitorear la dinámica de los almacenamientos de carbono, y el balance de energía, que se dan en los ecosistemas manejados y no manejados a mediano-largo plazo (ver Figura 1).

Técnica de covarianza de vórtices

Medir la dinámica de los flujos ecosistémicos que ocurren entre los ecosistemas y la atmósfera y por lo tanto integrar cambios en los almacenes de carbono es posible a través de la técnica de covarianza de vórtices (Baldocchi, 2014; Delgado-Balbuena *et al.*, 2019). La técnica de covarianza de vórtices (EC; *eddy covariance* en inglés) es un método que mide la covarianza instantánea de la velocidad vertical del viento y la concentración de gases en una parcela de aire a una alta resolución temporal con lo cual se puede cuantificar un flujo en periodos de tiempo discretos como 30 min (Baldocchi, 2003). La técnica de EC permite cuantificar el intercambio de GEI (como CO₂, CH₄, N₂O, H₂O) entre la superficie y la atmósfera, así como los componentes del balance de energía (radiación neta, flujos de calor sensible, calor latente, y calor en suelo; Fig. 1), mediante instrumentos instalados en una torre a cierta altura por encima de la superficie de interés. La técnica de EC tiene la capacidad de muestrear de manera no destructiva los flujos ecosistémicos a una escala temporal de minutos a años de manera continua, e importantemente, a una escala espacial que va de los cientos de metros a un par de kilómetros a partir de la torre. La escala espacial es pertinente ya que es similar a la de las intervenciones antropogénicas; por ejemplo: se deforesta/siembra una parcela, se seca un humedal, se construye un edificio y se quema un bosque. Actualmente, observatorios instrumentados para la técnica de EC monitorean continuamente diferentes superficies (ecosistemas manejados y no manejados) alrededor del mundo precisamente porque es la técnica adecuada para obtener observaciones directas de los flujos de los ecosistemas (<https://fluxnet.org/>). No obstante, sus

ventajas, es igualmente importante destacar las principales limitaciones prácticas de la técnica de EC: su costo de implementación y la destreza técnica que demanda su ejecución correcta son relativamente altos. Por otra parte, los supuestos teóricos sobre los que se basa el método implican que su funcionamiento es óptimo en terreno plano y con una cobertura suficientemente homogénea. En reconocimiento de tales desventajas, la comunidad científica complementa con frecuencia la implementación de la técnica con inventarios de biomasa y otras mediciones tradicionales de almacenes de carbono, con monitoreos simultáneos de fenología foliar, flujo de savia, respiración de suelo mediante cámaras, así como con la utilización de modelos ecosistémicos. Estas técnicas complementarias ayudan a constreñir y comparar la magnitud de los flujos obtenidos mediante EC, de tal suerte que los observatorios equipados para la técnica de EC suelen convertirse en ‘super sitios’ de monitoreo del ecosistema, y en puntos de validación de productos satelitales y de modelaje.

Las mediciones de flujos ecosistémicos con la técnica de EC son herramientas que ayudan a generar, monitorear y aplicar Soluciones Climáticas Naturales (Hemes *et al.*, 2021) al proveer información sobre: 1) la naturaleza de los cambios en los reservorios de carbono, al integrar múltiples fuentes o sumideros y resolviendo cambios sutiles en los reservorios, que, de otra forma requerirían esquemas extensivos y onerosos de muestreo en campo; 2) las variaciones de las fuentes de emisión de otros potentes GEI cuyas emisiones provienen de “hotspots” (CH₄) o son altamente intermitentes (N₂O) como es el caso de la agricultura; 3) detectar las retroalimentaciones biofísicas que a su vez influyen en las emisiones de GEI, como son propiedades de superficie (ej. rugosidad, albedo), o la separación de la energía en sus componentes como calor latente y sensible; y, 4) observar la variación interanual de las emisiones de GEI, y los presupuestos de agua y carbono en ecosistemas. Estos cuatro puntos anteriores permiten poner en contexto cambios no lineales en ecosistemas a través del tiempo, debido a perturbaciones naturales y antropogénicas al considerar retroalimentaciones de otros componentes de cambio (p. ej., eventos extremos, depósito de nitrógeno exógeno, fertilización de las plantas por el incremento de CO₂). Debido a que la técnica de EC es automática y continua, es posible observar cómo los

procesos ecosistémicos asociados a las emisiones de GEI responden a los cambios ambientales en el corto y largo plazo.

Un ejemplo para el potencial de uso de una Solución Climática Natural en ecosistemas mexicanos utilizando datos de la técnica de EC en México reside en Verduzco *et al.* (2018), en donde una combinación de observaciones y modelaje ecosistémico involucrando procesos básicos, relacionados al intercambio de flujos ecosistémicos de carbono y de agua, en un matorral subtropical de Sonora, permitió generar proyecciones de cambio climático ante diferentes escenarios de incremento de la temperatura y CO₂ atmosférico. Los resultados arrojaron diversos escenarios de cambio climático donde se evidencia un efecto negativo claro (disminución) en la productividad neta del ecosistema (ganancia neta de carbono) de estos matorrales ante el incremento de temperatura, pero un amortiguamiento por el efecto de fertilización de CO₂ en la vegetación debido al incremento de CO₂ en la atmósfera. Sin embargo, destaca que la eficiencia de uso de agua de este ecosistema ante esta condición de cambio climático podría ser aumentada, lo cual sería una ventaja competitiva ante escenarios concurrentes de disminución de la disponibilidad de agua en estas regiones semiáridas. De esta forma, el monitoreo de ecosistemas utilizando la técnica de EC es de suma importancia para proveer información oportuna que ayuden a las estrategias de mitigación y adaptación de los ecosistemas ante el cambio climático.

Los modelos de proyección climática como los utilizados por Verduzco *et al.* (2018), pueden mejorarse con información relativa a la distribución del carbono en la biomasa. Aun así, esta información sobre las proyecciones de carbono y la distribución en la biomasa son de suma importancia en los mercados de carbono que generan proyecciones de GEI (CO₂ equivalente) para el comercio de bonos de carbonos en las comunidades mexicanas (p.ej., a través del Comité de Comercio y Medio Ambiente de la Organización Mundial del Comercio, <https://www.wto.org/> y la www.mexico2.com.mx/). Para implementar este tipo de resultados a partir del monitoreo continuo a largo plazo con la técnica de EC y hacia la predicción ecológica o como insumo para diseñar y evaluar Soluciones Climáticas Naturales se requiere, sin embargo, de esfuerzos institucionales más amplios (Vargas *et al.*, 2012; Hemes *et al.*, 2021).

RED MEXICANA DE FLUJOS ECOSISTÉMICOS (MexFlux)

En México, la red nacional para el monitoreo de los flujos ecosistémicos y GEI con la técnica de EC se llama MexFlux (Figura 2; Vargas *et al.*, 2013). El objetivo principal de MexFlux es coordinar esfuerzos para avanzar en las investigaciones de los flujos ecosistémicos y la dinámica que estos tienen en los ecosistemas terrestres, acuáticos, costeros, y marinos a causa de la variabilidad climática y la transformación ambiental (p. ej., cambio de uso de suelo y de paisaje) como factores de cambio global. La información generada por MexFlux es de suma importancia para entender los controles ambientales actuales y futuros sobre el intercambio de agua, controles en el almacenamiento y liberación de carbono y otros

GEI, y sobre el balance energético superficial a nivel ecosistema, en distintas escalas espacio-temporales (Plan de estratégico MexFlux, <http://pmcarbono.org/pmc/>).

La visión de MexFlux es participar en la resolución de problemas ambientales nacionales, y pretende insertarse en iniciativas internacionales como FLUXNET (<http://fluxnet.ornl.gov/>), la cual es una red global para la medición de vapor de agua (evapotranspiración), CO₂ y energía en ecosistemas terrestres que incorpora más de 500 observatorios de monitoreo. En los últimos años MexFlux ha comenzado una coordinación importante con la red continental de las Américas con sede en EEUU (AmeriFlux, <https://ameriflux.lbl.gov/>) en donde se construyen sinergias importantes hacia trabajos de síntesis regionales a nivel continental (Barnes *et al.*, 2021, Biederman *et al.*, 2017).

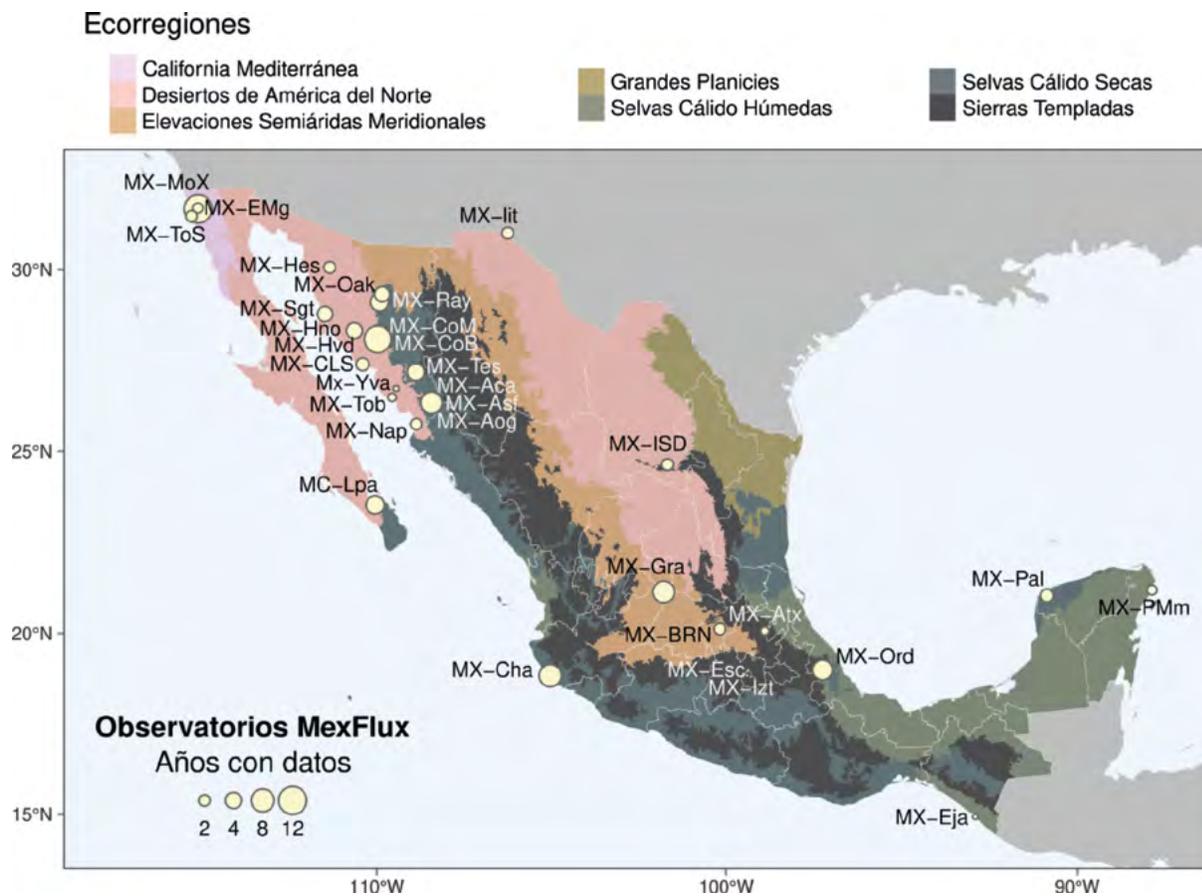


Figura 2. Observatorios de flujos de CO₂, agua y de energía de la Red Mexicana de Flujos Ecosistémicos (MexFlux) y su representatividad en las ecorregiones y estados de México. El tamaño de los símbolos indica la cantidad de años con datos para cada uno de los observatorios. El nombre, superficie y ubicación de los observatorios aparece en el Cuadro 2.

La relevancia de MexFlux radica en el monitoreo automatizado y coordinado en distintos observatorios a corto, medio, y largo plazo en México, que permita incrementar el conocimiento y mejorar las predicciones de los impactos del cambio climático global en distintos ecosistemas y regiones, algunas de éstas altamente sensibles a cambios en la temperatura y patrones de precipitación (Vargas *et al.*, 2013,

Cuadro 1). Este monitoreo ha contribuido a avanzar el conocimiento sobre las implicaciones del cambio de cobertura y/o uso del suelo sobre el balance de energía de la superficie (p.ej., Holwerda *et al.*, 2016), lo cual, a su vez, abona al conocimiento del impacto de estas alteraciones antrópicas sobre los procesos atmosféricos y las causas biofísicas del cambio climático regional y global (Alkama y Cescatti, 2016).

Cuadro 1. Observatorios de MexFlux con datos publicados a escala anual.

Observatorio	Superficie	ID	Latitud	Longitud	Años	Referencia
Querétaro	Urbano	MX-	31.7	-106.4	2020-	-
Escandón	Urbano	MX-Esc	19.4	-99.2	2006	Velasco <i>et al.</i> (2009)
Iztapalapa	Urbano	MX-Izt	19.4	-99.1	2003 2011-2012	Velasco <i>et al.</i> (2005) Velasco <i>et al.</i> (2014)
Ciudad Juárez	Urbano	MX-lit	31.7	-106.4	2020-2021	Pérez-Ruiz <i>et al.</i> (2021a)
Atopixco	Bosque templado	MX-Atx	20.6	-98.6	2017-2018	Hidalgo-Sánchez <i>et al.</i> (2020)
Sierra los Locos	Bosque de encinos	MX-Oak	30.0	-110.5	2008-2013	Pérez-Ruiz <i>et al.</i> (2021b)
Álamos	Selva baja caducifolia (Maduro)	MX-Aog	27.0	-108.8	2016-2018	Rojas-Robles <i>et al.</i> (2020)
Álamos	Selva baja caducifolia (Secundario)	MX-Asf	27.0	-108.8	2015-2020	Rojas-Robles <i>et al.</i> (2018)
Tesopaco	Selva baja caducifolia	MX-Tes	27.8	-109.3	2004-2008	Verduzco <i>et al.</i> (2015)
El Palmar	Selva baja caducifolia	MX-Pal	21.0	-90.1	2016-2019	Uuh-Sonda <i>et al.</i> (2018)
Chamela	Selva baja caducifolia	MX-Cha	19.5	-105.0	2007-2015	González-del Castillo <i>et al.</i> (2018a)

Cuadro 1. Observatorios de MexFlux con datos publicados a escala anual (Continuación).

Observatorio	Superficie	ID	Latitud	Longitud	Años	Referencia
El Mogor	Matorral esclerófilo	MX-EMg	32.0	-116.6	2008-	Villarreal <i>et al.</i> (2016)
Rayón	Matorral subtropical	MX-Ray	29.7	-110.5	2008-2014	Verduzco <i>et al.</i> (2018)
La Paz	Matorral sarcocuale	MX-Lpa	24.1	-110.4	2001-	Bell <i>et al.</i> (2012)
Bernal	Matorral	MX-BRN	20.7	-99.9	2017-2018	Guevara-Escobar <i>et al.</i> (2020)
San Isidro	Matorral	MX-ISD	25.3	-101.3	2019-2020	Torres-Arreola (2021)
La Colorada	Pastizal inducido / sabana	MX-CoB	28.7	-110.5	2011-	Hinojo-Hinojo <i>et al.</i> (2016)
La Colorada	Matorral	MX-CoM	28.7	-110.5	2011-	Hinojo-Hinojo <i>et al.</i> (2019)
Ojuelos	Pastizal semiárido	MX-	21.8	-101.6	2011-2017	Delgado-Balbuena <i>et al.</i> (2019)
La Orduña	Cafetal bajo sombra	MX-Ord	19.47	-96.93	2006-2008 2014-2018	Holwerda <i>et al.</i> (2013) Holwerda <i>et al.</i> (2016)
Nogal-Hermosillo	Bosque de Nogal	MX-Hno	28.9	-111.3	2017-2021	Rodríguez (comunicación personal, enero 2022)
Esp-Hermosillo	Cultivo de espárragos	MX-Hes	30.6	-112.2	2019-2020	Rodríguez (comunicación personal, enero 2022)
Vid-Hermosillo	Cultivo de uva	MX-Hvi	28.9	-111.3	2018-2021	Rodríguez (comunicación personal, enero 2022)

Cuadro 1. Observatorios de MexFlux con datos publicados a escala anual (Continuación).

Observatorio	Superficie	ID	Latitud	Longitud	Años	Referencia
El Sargento	Manglar	MX-Sgt	29.3	-112.3	2014-2016	Vargas-Terminel <i>et al.</i> (2016)
Navopatia	Manglar	MX-Nap	26.4	-109.2	2017-2019	Granados-Martínez <i>et al.</i> (2021)
La Encrucijada	Mangle	MX-Eja	15.09	-92.77	2014 (meses)	-
Tobari	Mangle	MX-Tob	27.1	-110.0	2014-2016	Vargas-Terminel <i>et al.</i> (2016)
Puerto Morelos	Manglar	MX- PMm	20.8	-86.9	2017-2018	Alvarado-Barrientos <i>et al.</i> (2021)
Estero El Soldado	Laguna costera	MX-CLS	28.0	-111.0	2018-	Benítez-Valenzuela y Sanchez-Mejía (2020)
Todos Santos	Océano	MX-ToS	31.8	-116.8	2008-2009	Reimer <i>et al.</i> (2013)

La información recopilada por MexFlux tiene la capacidad de generar productos con alto valor agregado y alta calidad, como observaciones directas de: precipitación, temperatura de aire y suelo, humedad del suelo a distintas profundidades, radiación solar en distintas longitudes de onda, dirección y velocidad de viento, y concentraciones atmosféricas de GEI (principalmente CO₂ y H₂O). Estudios especializados que utilizan datos de MexFlux han contribuido a la validación de productos satelitales (p. ej., Uuh-Sonda *et al.*, 2018), la validación de modelos hidrológicos (p. ej., Mendez-Barroso *et al.*, 2014) y Modelos Globales del Clima (p. ej., Murray-Tortarolo *et al.*, 2016; Verduzco *et al.*, 2018). Aunque los modelos matemáticos son muy rentables (la relación información-costos es alta), su validación requiere forzosamente de trabajo de monitoreo, de observaciones en el mundo real, y precisamente la técnica de EC provee estas herramientas (King *et al.*, 2015; Murray-Tortarolo *et al.*, 2016). Asimismo, algunas relaciones funcionales de los ecosistemas (como la relación carbono-agua de

la vegetación), han sido estudiadas utilizando datos de MexFlux, y con esto se han desarrollado parámetros específicos como la eficiencia del uso del agua (Tarin *et al.*, 2020); eficiencia de uso de radiación, (Rojas-Robles *et al.*, 2020); fenología de la vegetación; (Cueva *et al.*, 2021, González del Castillo *et al.*, 2018b) que permiten ajustar modelos de procesos ecosistémicos y Modelos Globales del Clima para generar diversos escenarios de cambio climático a nivel local y regional (Murray-Tortarolo *et al.*, 2016; Tarin *et al.*, 2020; Verduzco *et al.*, 2018). Sin embargo, existen aún brechas de conocimiento y futuras investigaciones que pueden realizarse utilizando las bases de datos de MexFlux en combinación con datos derivados de otras metodologías que se pueden implementar en los mismos observatorios (p.ej., cámaras fenológicas, isótopos estables, cámaras de respiración, percepción remota proximal, intercambio de gases a nivel de la planta y de hoja) y con ello avanzar en nuestra comprensión mecanicista del funcionamiento de los ecosistemas de México (Cuadro 2).

Cuadro 2. Las investigaciones a través de MexFlux buscan contestar las siguientes preguntas fundamentales para el entendimiento de la función de los ecosistemas y su uso como Soluciones Climáticas Naturales.

Pregunta	Estrategia / metodología	Productos
¿Cuáles ecosistemas/superficies mexicanas funcionan como sumideros de carbono? ¿A qué escala temporal?	Monitoreo continuo de la covarianza entre la velocidad vertical del viento y la concentración del gas (CO_2 , CH_4) en la atmósfera (técnica de <i>eddy covariance</i>).	Series del intercambio neto de carbono del ecosistema (NEE) y su fraccionamiento en productividad primaria bruta (GPP) y respiración del ecosistema (R_{eco}) a escala diaria, estacional, anual, decadal.
¿Cuáles son los factores ambientales que controlan los flujos ecosistémicos de carbono, agua y energía?	Medición simultánea de flujos y variables meteorológicas incluyendo físico-químicas del suelo/agua e hidro-período cuando sea aplicable.	Series temporales de temperatura, humedad del aire, precipitación, radiación neta y sus componentes, temperatura y humedad edáficas.
¿Cuáles son las características estructurales y funcionales del ecosistema/superficie que controlan los flujos de carbono, agua y energía?	Medición continua o episódica de variables estructurales y funcionales de la vegetación/productores primarios en la superficie de interés.	Series temporales de índices de área foliar (LAI), índices fenológicos (e.g. NDVI <i>in situ</i> , Green Chromatic Coordinate), contenidos de nutrientes en suelo o agua.
¿Cuál es el impacto del cambio de cobertura/uso del suelo en los componentes del balance de energía?	Comparación del balance de energía de distintas superficies (ecosistemas) que representen trayectorias de cambio de uso de suelo, incluyendo observatorios bajo restauración ecológica.	Series del balance de radiación, albedo, flujo de calor sensible, flujo de calor latente (y el cociente entre ambos o razón de Bowen), flujo de calor en suelo, resistencia aerodinámica, rugosidad de la superficie, a escala temporal diaria a decenal, y sobre superficies con diferente cobertura vegetal.
¿Qué implicaciones tienen las alteraciones en el balance de energía sobre procesos atmosféricos?		
¿Cuál es el impacto inmediato y legado de eventos extremos (p. ej. incendios, huracanes) en los flujos ecosistémicos?	Movilización de un sistema de <i>eddy covariance</i> de instalación rápida en el observatorio afectado.	Series de flujos de GEI, agua y componentes del balance energético en los días y meses posteriores al evento extremo.

Cuadro 2. Las investigaciones a través de MexFlux buscan contestar las siguientes preguntas fundamentales para el entendimiento de la función de los ecosistemas y su uso como Soluciones Climáticas Naturales (Continuación).

Pregunta	Estrategia / metodología	Productos
¿Cuál es el consumo de agua de los agroecosistemas mexicanos extensivos?, ¿Qué prácticas de manejo contribuyen a mayor eficiencia en el uso del agua?	Campañas de comparación de flujos de carbono, agua y energía entre agroecosistemas con distintas prácticas de manejo	Estimaciones de evapotranspiración (ET), productividad primaria y eficiencia en uso de agua en agroecosistemas con diferente manejo
¿Cómo son las proyecciones de los flujos ecosistémicos ante la variabilidad climática?	Simulación de escenarios climáticos como el incremento en la temperatura, en el CO ₂ , y/o cambios en los regímenes de precipitación.	Escenarios sobre el funcionamiento de los ecosistemas mexicanos que permitan implementar estrategias de adaptación y mitigación para el beneficio de las comunidades
¿Cuál es la magnitud y dinámica de los flujos laterales de carbono en ecosistemas acuáticos, costeros y marinos? ¿Qué condiciones ambientales alteran considerablemente estos flujos? ¿Cómo se comparan/integran estos flujos laterales en ecosistemas acuáticos y costeros con los flujos verticales?	Monitoreo de los flujos laterales de carbono adicionalmente a los verticales, así como complementar a base de experimentos realizados en campo o en laboratorio para hacer modificaciones a los controles biofísicos.	Estimaciones más completas de los flujos y almacenes de carbono en ecosistemas acuáticos, costeros y marinos. Comparaciones de diferentes condiciones ambientales en los ecosistemas acuáticos, costeros y marinos para identificar cambios en los flujos ecosistémicos a causa de los factores físicos y químicos del ambiente y su conexión con ambientes aledaños.

La presencia e impacto de MexFlux con la comunidad científica internacional actual se evidencia en el reciente número especial publicado en la revista internacional *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences* de la American Geophysical Union (JGR: Biogeosciences, AGU; [https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/toc/10.1002/\(ISSN\)2169-8961.MEXFLUX](https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/toc/10.1002/(ISSN)2169-8961.MEXFLUX)). Entre los artículos de investigación que se publicaron en este número especial se muestran casos de estudio que resaltan la importancia del monitoreo de los flujos ecosistémicos utilizando la técnica de EC en

ecosistemas relevantes de México (p. ej. ecosistemas semiáridos, manglares, agroecosistemas). Además, es importante señalar que desde la instalación de los primeros observatorios utilizando la técnica EC en el mundo (1980's), el primer estudio del balance de energía realizado en México se llevó a cabo a finales los 90s (Tejada-Martínez, 1996) y a la fecha se cuenta con más de 70 publicaciones entre las que destacan artículos científicos nacionales e internacionales, capítulos de libros, y tesis de estudiantes de licenciatura y posgrado. Algunos de los trabajos recientes integran

la información de varios observatorios para resolver preguntas enfocadas en procesos atmosféricos y se ha comenzado con colaboraciones en síntesis regionales y globales (Villarreal *et al.*, 2016, Biederman *et al.*, 2016, Figueroa-Espinoza *et al.*, 2021, Pérez-Ruiz *et al.*, 2021, Van Dam *et al.*, 2021). Estos productos son de gran utilidad tanto para la comunidad científica, el público en general y para tomadores de decisiones en materia ambiental, debido a que algunos de los ecosistemas monitoreados por MexFlux se encuentran subrepresentados tanto a nivel nacional como internacional en los Modelos Globales de Clima (Villarreal *et al.*, 2019; Villarreal *et al.*, 2021; Pastorello *et al.*, 2020). Sin embargo, también se destaca la falta de representatividad espacial de MexFlux a nivel nacional para el monitoreo de los diversos ecosistemas y se discuten algunas acciones potenciales para su crecimiento a continuación (Villarreal *et al.*, 2019).

RETOS, LIMITACIONES Y APORTACIONES DE MexFlux

Retos y limitaciones

Los esfuerzos iniciales de MexFlux han fructificado en la publicación de la primera base de datos de flujos verticales a escala diaria disponible a través del Programa Mexicano del Carbono (Balbuena *et al.*, 2019). En el Primer Reporte del Estado del Ciclo del Carbono en México, Agenda Azul y Verde, se contó con un total de 53 años de monitoreo en 14 observatorios de ecosistemas mexicanos (Balbuena *et al.*, 2019). Igualmente, MexFlux ha avanzado en la incorporación de datos de 6 observatorios con un total de 19 años-observatorios en el repositorio público de la red continental AmeriFlux al apegarse a los altos estándares internacionales de calidad metodológica (<https://ameriflux.lbl.gov/sites>). Se encuentran además en proceso de ser incorporados otros 7 observatorios en AmeriFlux, sumando un total de 13 observatorios. Sin embargo, MexFlux enfrenta fuertes limitaciones en cuanto al número de observatorios y a la configuración espacial de los mismos (Villarreal *et al.*, 2019), los cuales han sido seleccionados desde una organización del tipo ascendente (*bottom-up*) y ha sido uno de los factores limitantes para su desarrollo.

Una organización ascendente está caracterizada por un crecimiento de los observatorios de monitoreo con base en intereses individuales de los distintos grupos de investigación (Villarreal *et al.*, 2019;

Scholes *et al.*, 2012). Este tipo de organización tiene la ventaja de una coordinación flexible que pudiera comprender un mayor rango de aplicaciones y, por el contrario, fácilmente se puede presentar un bajo nivel de interoperabilidad que limite el desarrollo de la red y se limite la representatividad espacial (Vargas *et al.*, 2017; Villarreal *et al.*, 2019). Una organización del tipo descendente presenta un enfoque más centralizado, el cual se basa en metas comunes y bien definidas para los distintos grupos de investigación; su implementación requiere un alto nivel de interoperabilidad entre sus distintos grupos, y sus aplicaciones pueden encontrarse limitadas por los objetivos particulares de la red monitoreo (Villarreal *et al.*, 2019; Vargas *et al.*, 2017). Es posible combinar ambos modelos organizacionales en uno mixto (ascendente - descendente). Esto permite un desarrollo óptimo de la red en el cual se tenga un alto nivel de interoperabilidad (i.e., colaboración entre distintos grupos para recolectar, compartir, y analizar la información; Vargas *et al.*, 2017) y un abanico más amplio de los productos de valor agregado generados por MexFlux (Villarreal *et al.*, 2019; Holzer *et al.*, 2018).

La falta de financiamiento para sostener la operación y mantenimiento de los observatorios a largo plazo sigue siendo uno de los mayores retos estratégicos para el funcionamiento futuro de MexFlux. Esto también limita sumar nuevos observatorios de monitoreo para garantizar mayor representatividad de los ecosistemas mexicanos. Al ser un país con una alta biodiversidad a nivel ecosistema y gran complejidad topográfica, México representa un desafío de monitoreo del intercambio superficie-atmósfera de materia y energía a una escala nacional; actualmente se tiene una representatividad superficial menor al 5% en la dinámica de captura de carbono y evapotranspiración (Villarreal *et al.*, 2019). No obstante, un esfuerzo coordinado de monitoreo entre los distintos grupos de investigación y gobierno, en donde se definan observatorios prioritarios de monitoreo, pudiera incrementar sustancialmente la representatividad a nivel nacional (Villarreal *et al.*, 2019). Para esto se requiere la implementación de distintas estrategias financieras y logísticas que impulsen la interoperabilidad y se apoye la colaboración entre distintos grupos para coordinar la instalación y el mantenimiento a largo plazo de nuevos observatorios, así como el recolectar, compartir y analizar la información actual de MexFlux (Vargas *et al.*, 2013; Vargas *et al.*, 2017).

Aportaciones futuras y Agenda hacia el Segundo Reporte del Estado del Carbono en México

Uno de los problemas más apremiantes para México es el impacto que el cambio climático y la degradación ambiental pueda tener en los bienes y servicios que la sociedad obtiene directa e indirectamente de los ecosistemas (Diffenbaugh *et al.*, 2008). Para ello se ha establecido el Programa Nacional Estratégico de Sistemas Socioecológicos y Sustentabilidad (PRONACES - SSyS) del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) enfocado a promover acciones de conservación, restauración, y aprovechamiento sustentable de los ecosistemas basado en el conocimiento del entorno biofísico y social. Para lograr que dichas estrategias tengan una incidencia directa en el desarrollo de políticas públicas que atiendan la problemática actual y futura de México, se requiere de un esfuerzo coordinado no solo del monitoreo ambiental sino también de los flujos que rigen el funcionamiento de la productividad de los ecosistemas en México.

Los observatorios MexFlux, al conformar una red a escala nacional de sitios de monitoreo que comprenden un amplio abanico de componentes del ecosistema (p.ej., captura de carbono, respiración del suelo, transpiración; Figura 1 y 2), que pueden complementar los esfuerzos existentes de redes temáticas CONACyT como el *Programa Mexicano del Carbono*, y contribuir a entender cómo los ecosistemas terrestres, acuáticos, costeros, y marinos responden al cambio climático. Dicho conocimiento es necesario para el desarrollo de alternativas de manejo, gobernanza, y políticas públicas para el desarrollo económico y social de México sin comprometer el funcionamiento y biodiversidad de los ecosistemas naturales. Por lo tanto, es necesario que los observatorios MexFlux sean capaces de recolectar información ecológica de largo plazo en ecosistemas representativos del país y de ser integrados dentro de los planes estratégicos para el uso y manejo de los ecosistemas.

Por último, es importante resaltar que la información generada por el monitoreo continuo a largo plazo de los flujos ecosistémicos utilizando la técnica de EC en los ecosistemas mexicanos tiene las siguientes aportaciones:

1. Se realizan estimaciones de la dinámica del carbono y los almacenamientos de carbono, así como su variabilidad temporal que permite minimizar las incertidumbres del inventario de carbono a nivel nacional.
2. Se mejoran los presupuestos de agua a escala local, de cuenca y regional, al medir directamente la evapotranspiración, que es un componente del ciclo hidrológico que típicamente es calculado a partir de los otros componentes (por ej. precipitación y escorrentía). Al tener observaciones a largo plazo de la evapotranspiración se investiga el papel que juega la vegetación en la recirculación del agua y las respuestas de la vegetación a los cambios en la disponibilidad del agua (en suelos y mantos freáticos).
3. Se avanza en el conocimiento sobre las alteraciones al balance de energía de la superficie debidas al cambio en la cobertura y uso del suelo y, por ende, el impacto de estas alteraciones sobre procesos atmosféricos y afectaciones biofísicas al clima local/regional.
4. Se desarrollan estimaciones más precisas sobre las respuestas de los flujos ecosistémicos ante la variabilidad climática (en diferentes escalas locales, regionales y locales) al utilizar la información de los observatorios de ecosistemas mexicanos en los Modelos Globales del Clima, en lugar de usar factores o datos de entrada de observatorios que no corresponden a las características de los ecosistemas/superficie del territorio mexicano.

Para la implementación de las cuatro aportaciones mencionadas anteriormente, así como la formación de recursos humanos y divulgación de la ciencia que proviene de los observatorios de MexFlux; los investigadores, académicos y técnicos miembros de la MexFlux trabajarán en una serie de actividades propuestas en el Cuadro 3. Con este plan de trabajo rumbo al Segundo Reporte del Estado del Ciclo del Carbono en México (agenda 2023), se pretende avanzar en la evaluación y síntesis de flujos ecosistémicos en ecosistemas de México, y así consolidar las colaboraciones con los diversos grupos de investigación a nivel nacional e internacional.

Cuadro 3. Cronograma de trabajo hacia el Segundo Reporte del Estado del Ciclo del Carbono en México para el 2023/2024 (agenda 2023).

Área	Oct-Dic 2021	Ene-Jun 2022	Jul-Dic 2022	Ene-Jun 2023	Jul-Dic 2023
Investigación	Monitoreo continuo en observatorios activos y reactivar/incorporar nuevos observatorios				
			Coordinación, estructura y desarrollo hacia el Segundo Reporte del Estado del Ciclo del Carbono en México		
	Invitación a los investigadores principales a sumarse actividades de la Agenda 2022 de MexFlux				
	Publicaciones científicas usando datos de MexFlux				
	Síntesis de datos a repositorios de AmeriFlux en temas selectos y colaboración con redes regionales e internacionales				
Difusión	Desarrollo de página web				
	Blog de difusión para "Amigos de MexFlux"				
	sesión especial en VIII Congreso Mexicano de Ecología		sesión especial en XIII Simposio Internacional del Carbono en México		
	Series de Seminarios MexFlux				
	Seminario I. "Conozcamos más acerca de los observatorios de MexFlux"		Seminario II. "Trabajo de campo y seguridad" En conjunto con AmeriFlux		
Formación de recursos humanos	Serie de videos demostrando la técnica EC				
				Taller I. Procesamiento básico de datos EC	Taller II. Formato de datos para AmeriFlux
	Coordinar actividades para la formación de estudiante con redes regionales e internacionales (FLUXNET, AmeriFlux, OzFlux, entre otras)				

CONCLUSIÓN

El conocimiento sobre las interacciones superficie-atmósfera era limitado hace solo unas pocas décadas por la falta de observaciones directas de los flujos de energía, agua y carbono (Eagleson 1981). En la actualidad, estas observaciones las proporcionan los observatorios de flujos ecosistémicos instrumentados para la técnica de EC. A pesar de que han aumentado considerablemente estas observaciones alrededor del mundo, las superficies y ecosistemas típicos de las latitudes que comprende el territorio mexicano aún constituyen importantes vacíos de conocimiento con relevancia local, regional y mundial. Dada la actual crisis climática global, contribuir a reducir estos vacíos de conocimiento es inaplazable.

En conjunto, el conocimiento sobre los flujos ecosistémicos es necesario para transitar hacia el bienestar social, manejo sustentable de los territorios y ecosistemas ante los retos del cambio global. La observación detallada (espacial y temporalmente) del intercambio de energía, agua y carbono entre distintos tipos de superficies y la atmósfera, abarcando una escala espacial similar a las intervenciones antropogénicas sobre los territorios, está demostrando ser tan relevante como la observación amplia del planeta desde el espacio. Generar este conocimiento y entender el funcionamiento de los ecosistemas y sus retroalimentaciones al sistema climático es importante para poder así predecir las respuestas de los ecosistemas a la variabilidad climática y ambiental, así como las pérdidas de los recursos naturales y la biodiversidad.

LITERATURA CITADA

- Abbot, B.J., K. Bishop, J. P. Zarnetske, D. M. Hannah, R. J. Frei, C. Minaudo, F. S. Chapin, S. Krause, L. Conner, D. Ellison, S. E. Godsey, S. Plont, J. Marcias, T. Kolbe, A. Huebner, T. Hampton, S. Gu, M. Buhman, S. S. Sayedi, O. Ursache, M. Chapin, K. Henderson and G. Pinay. 2019. A water cycle for the Anthropocene. *Hydrological Processes* 33:23, 3046-3052.
- Acuerdo de París. 2015. Acuerdo de París, Naciones Unidas. United Nations Climate Change. París. <https://www.un.org/es/climatechange/paris-agreement>. (Consulta: noviembre 10, 2021)
- Alkama, R. and A. Cescatti. 2016. Biophysical climate impacts of recent changes in global forest cover. *Science*. 2016 5:351(6273):600-4.
- Alvarado-Barrientos, M. S., H. López-Adame, H. E. Lazcano-Hernández, J. Arellano-Verdejo and H. A. Hernández-Arana. 2021. Ecosystem-atmosphere exchange of CO₂, water, and energy in a basin mangrove of the northeastern coast of the Yucatan Peninsula. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 126:2.
- Aryal, R. D., D. E. Morales Ruiz, C. N. Tondopó Marroquín, R. Pinto Ruiz, F. Guevara Hernández, J. A. Venegas Venegas, A. Ponce Mendoza, G. Villanueva López, F. Casanova Lugo, L. A. Rodríguez Larramendi, A. Ley de Coss, A. Hernández López, F. J. Medina Jonapá, C. A. Velázquez Sanabria, A. Alcudia Aguilar and I. Euán Chi. 2018. Soil organic carbon depletion from forests to grasslands conversion in Mexico: A Review. *Agriculture*; 8, 181.
- Barnes, M. L., M. M. Farella, R. L. Scott, D. J. P. Moore, G. E. Ponce Campos, J. A. Bierderman, N. MacBean, M. E. Litvak, D. D. Breshears. 2021. Improved dryland carbon flux predictions with explicit consideration of water-carbon coupling. *Nature*, 2:248.
- 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. 2003. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present, and future. *Global Change Biology* 9, 479- 492.
- Benítez Valenzuela, L. I. and Z. M. Sánchez Mejía. 2020. Observations of turbulent heat fluxes variability in a semiarid coastal lagoon (Gulf of California). *Atmosphere*, 11(6), 626.
- Bell, W. T., O. Menzer, E. Troyo Dieguez 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*, 18:8, 2570-2582.
- Bierderman, J. A., R. L. Scott, W. T. Bell, D. R. Bowling, S. Dore, J. Garatuza Payán, T. E. Kolb, *et al.* 2017. CO₂ Exchange and evapotranspiration across dryland ecosystems of southwestern North America. *Global Change Biology* 23 (10): 4204–21.
- Birdsey, R., A. Ángeles Pérez, A. W. Kurz, M. L. Olguín, Y. Pan, C. Wayson, B. Wilson and K. Johnson. 2013. Approaches to monitoring changes in carbon stocks for REDD+. *Carbon Management* 4: 519-537.
- Bonan, G. B. 2008. Forests and climate change: forcing, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*; 320(5882): 1444-1449.
- Bond-Lamberty, B., V. L. Bailey, M. Chen, C. M. Gough and R. Vargas, R. 2018. Globally rising Soil heterotrophic respiration over recent decades. *Nature* 560 (7716): 80–83.
- Chapin, F. S. 2002. Principles in terrestrial ecosystem ecology / F. Stuart Chapin III, Pamela A. Matson, Harold A. Mooney. Springer-Verlag New York, Inc., United States of America.

- CONAFOR. 2020. Guía de uso de los productos del sistema Satelital de Monitoreo Forestal: enfoque pared a pared. Documento técnico. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/587193/Gui_a_de_uso_de_los_productos_del_sistema_SAMOF_v1.pdf. (Consulta: noviembre 10, 2021)
- Cubasch, U., D. Wuebbles, D. Chen, M. C. Facchini, D. Frame, N. Mahowald and J. G. Winther. 2013. The physical science basis. Contribution of working group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 119-158.
- Cueva, A., S. H. Bullock, R. Méndez Alonzo, E. López Reyes and R. Vargas. 2021. Foliage Senescence as a key parameter for modeling gross primary productivity in a mediterranean shrubland. In *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 126:1.
- Delgado-Balbuena, J., J. T. Arredondo, H. W. Loesch, L. F. Pineda Martínez, J. N. Carbajal and R. Vargas. 2019. Seasonal precipitation legacy effects determine the carbon balance of a semiarid grassland. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 124(4), 987-1000.
- Delgado-Balbuena, J., E. A. Yépez González, F. Paz Pellat, G. Ángeles Pérez, C. Aguirre Gutiérrez, M. S. Alvarado Barrientos, J. T. Arredondo, F. Ayala-Niño, S. H. Bullock, A. E. Castellanos, *et al.* 2019. Base de datos de flujos verticales de dióxido de carbono en ecosistemas terrestres y costeros en México. Programa Mexicano del Carbono (PMC) *Elementos para Políticas Públicas*, 2:2, 93-108.
- Diffenbaugh, N. S., C. H. Krupke, M. A. White and C. E. Alexander. 2008. Global warming presents new challenges for maize pest management. *Environmental Research Letters*, 3:4.
- Domínguez, F., P. Kumar and E. R. Vivoni. 2008. Precipitation recycling variability and ecoclimatological stability—A study using NARR Data. Part II: North American monsoon region. *Journal of Climate* 21, 5187-5203.
- Eamus, D., T. Hatton, P. Cook and C. Colvin. 2006. *Ecohydrology: Vegetation Function, Water and Resource Management*. CSIRO PUBLISHING.
- Eagleson, P. S. 1981. Report of the JSC study conference on land surface processes in atmospheric general circulation models. *World Meteorological Organization*, WCP46, Geneva, Switzerland.
- Ellison, D., C. E. Morris, B. Locatelli, D. Sheil, J. Cohen, D. Murdiyarso, V. Gutiérrez, M. van Noordwijk, I. F. Creed, J. Pokorny, D. Gaveau, D. V. Spracklen, A. B. Tobella, U. Ilstedt, A. J. Teuling, S. G. Gebrehiwot, D. C. Sands, B. Muys, B. Verbist, *et al.* 2017. Trees, forests and water: Cool insights for a hot world. In *Global Environmental Change* (Vol. 43, pp. 51–61). <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.01.002>
- Figueroa-Espinoza, B., Z. M. Sánchez Mejía, J. M. Uuh Sonda, P. Salles, L. Méndez Barroso and H. A. Gutiérrez Jurado. 2021. Friction Velocity estimation using a 2D Sonic Anemometer in Coastal Zones. *Atmósfera*.
- González del Castillo, E., U. K. T. Paw and A. Sanchez Azofeifa. 2018a. Turbulence scales for eddy covariance quality control over a tropical dry forest in complex terrain. *Agricultural and Forest Meteorology*, 249: 390-406.
- González del Castillo, E., A. Sanchez-Azofeifa, U. K. T. Paw, J. Gamon and M. Quesada. 2018b. Integrating proximal broadband vegetation indices and carbon fluxes to model gross primary productivity in a tropical dry forest. *Environmental Research Letters*, 13:065017.
- Griscom, B. W., J. Adams, P. W. Ellis, R. A. Houghton, G. Lomax, D. A. Miteva, W. H. Schlesinger, *et al.* 2017. Natural climate solutions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114 (44) 11645-11650.
- Guevara-Escobar, A., E. González Sosa, M. Cervantes Jiménez, H. Suzán Azpiri, M. E. Queijeiro Bolaños, I. Carrillo Ángeles and V. H. Cambrón Sandoval. 2021. Machine learning estimates of eddy covariance carbon flux in a scrub in the Mexican highland. *Biogeosciences*, 18(2), 367-392.
- Hemes, K. S., B. R. K. Runkle, K. A. Novick, D. D. Baldocchi and C. B. Field. 2021. An ecosystem scale flux measurements strategy to assess Natural Climate Solutions. *Environmental Science & Technology*, 55(6), 3494–3504.
- Hidalgo-Sánchez, M., G. Ángeles Pérez, E. A. Yépez González, F. O. Plascencia Escalante, J. Delgado Balbuena and T. M. González Martínez. 2021. Evapotranspiración e intercambio de energía en un bosque templado de México. *Tecnología y ciencias del agua*, 12(2), 490-537.
- 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 & Management*, 69:5, 334-341
- Hinojo-Hinojo, C., A. E. Castellanos, T. Huxman, J. C. Rodríguez, R. Vargas, J. R. Romo León and J. A. Biederman. 2019. Native shrubland and managed buffelgrass savanna in drylands: Implications for ecosystem carbon and water fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 268, 269-278.
- Holwerda, F., M. S. Alvarado Barrientos and T. González. 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: 13-28.
- Holwerda, F., L. A. Bruijnzeel, V. L. Barradas and J. Cervantes. 2013. The water and energy exchange of a shaded coffee plantation in the lower montane cloud forest zone of central Veracruz, Mexico. *Agricultural and Forest Meteorology*: 173, 1-13.

- Holzer, J. M., M. C. Adamescu, F. J. Bonet García, R. Díaz Delgado, J. Dick, J. M. Grove, *et al.* 2018. Negotiating local versus global needs in the International Long Term Ecological Research Network's socio-ecological research agenda. *Environmental Research Letters*, 13(10).
- IPCC 2021. Sixth Assessment Report: AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis. (<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>). (Consultado: noviembre 10, 2021)
- Jasechko, S., Z. D. Sharp, J. J. Gibson, S. J. Birks, Y. Yi and P. J. Fawcett. 2013. Terrestrial water fluxes dominated by transpiration. *Nature* 496, 347-350.
- Le Quéré, C., R. M. Andrew, P. Friedlingstein, S. Sitch, J. Pongratz, A. C. Manning, J. I. Korsbakken, G. P. Peters, J. G. Canadell, R. B. Jackson, T. A. Boden, P. P. Tans, O. D. Andrews, V. K. Arora, D. C. E. Bakker, L. Barbero, M. Becker, R. A. Betts, L. Bopp, F. Chevallier, L. P. Chini, P. Ciais, C. E. Cosca, J. Cross, K. Currie, T. Gasser, I. Harris, J. Hauck, V. Haverd, R. A. Houghton, C. W. Hunt, G. Hurtt, T. Ilyina, A. K. Jain, E. Kato, M. Kautz, R. Keeling, F. Klein, K. Goldewijk, A. Körtzinger, P. Landschützer, N. Lefèvre, A. Lenton, S. Lienert, I. Lima, D. Lombardozzi, N. Metz, F. Millero, P. M. S. Monteiro, D. R. Munro, J. E. M. S. Nabel, S. I. Nakaoka, Y. Nojiri, X. A. Padin, A. Peregon, B. Pfeil, D. Pierrot, B. Poulter, G. Rehder, J. Reimer, C. Rödenbeck, J. Schwinger, R. Séférian, I. Skjelvan, B. D. Stocker, H. Tian, B. Tilbrook, I. T. van der Laan-Luijkx, G. R. van der Werf, S. van Heuven, N. Viovy, N. Vuichard, A. P. Walker, A. J. Watson, A. J. Wiltshire, S. Zaehle and D. Zhu. 2017. Global Carbon Budget 2017. *Earth System Science Data Discussions*, 1-79.
- Méndez-Barroso, L. A., E. R. Vivoni, A. Robles Morua, G. Mascaro, E. A. Yépez, J. C. Rodríguez, C. Watts, J. Garatuz Payán, J. A. Saiz Hernández. 2014. A modeling approach reveals differences in evapotranspiration and its partitioning in two semiarid ecosystems in Northwest. *Water Resources Research* 50, 3229-3252.
- Murray-Tortarolo, G., P. Friedlingstein, S. Sitch, V. J. Jaramillo, F. Murguía Flores, A. Anav, Y. Liu, *et al.* 2016. The carbon cycle in Mexico: past, present and future of C stocks and fluxes." *Biogeosciences*. <https://doi.org/10.5194/bg-13-223-2016>.
- Pastorello, G., C. Trotta, E. Canfora, H. Chu, D. Christianson, Y. W. Cheah, *et al.* 2020. The FLUXNET2015 dataset and the ONEFlux processing pipeline for eddy covariance data. *Scientific data*, 7(1), 1-27.
- Plan Nacional de Desarrollo. 2019. Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024. Gobierno de México <https://presidente.gob.mx/plan-nacional-de-desarrollo-2019-2024/>. (Consultado: noviembre 10, 2021)
- Pérez-Ruiz, E. R., F. E. Vázquez Gálvez, Y. G. Hernández García, E. Flores Tavizon and A. Ortinez. 2021a. Temporal dynamics of carbon dioxide fluxes over Ciudad Juárez, Mexico. AGU Fall Meeting Abstracts.
- Pérez-Ruiz, E. R. E. R. Vivoni, E. A. Yépez, J. C. Rodríguez, D. J. Gochis, A. Robles-Morua, *et al.* 2021b. Landscape controls on water-energy-carbon fluxes across different ecosystems during the North American Monsoon. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 126(5), e2020JG005809.
- Pielke, S. R. A. 2005. ATMOSPHERIC SCIENCE: Land Use and Climate Change. *Science*, 310(5754), 1625–1626. doi:10.1126/science.1120529
- Reichstein, M., M. Bahn, M. D. Mahecha, J. Kattge and D. D. Baldocchi. 2014. Linking plant and ecosystem functional biogeography. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 111 (38): 13697–702.
- Reimer, J. J., R. Vargas, S. V. Smith, R. Lara Lara, G. Gaxiola Castro, J. M. Hernández Ayón, A. Castro, M. Escoto Rodríguez and J. Martínez Osuna. 2013. Air-sea CO₂ fluxes in the near-shore and intertidal zones influenced by the California current. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. <https://doi.org/10.1002/jgrc.20319>.
- Rojas-Robles, N. E., J. Garatuz Payán, J. C. Álvarez Yépez, Z. M. Sánchez Mejía, R. Vargas and E. A. Yépez. 2020. Environmental controls on carbon and water fluxes in an old-growth tropical dry forest. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 125(8), e2020JG005666.
- Rojas-Robles, N. E., E. A. Yépez, J. Garatuz Payán, M. Rivera, J. Madrigal, C. Coronel and R. Vargas. 2018. Carbon sequestration potential across a successional gradient of tropical dry forest in Northwestern Mexico. In *AGU Fall Meeting 2018*. AGU.
- Scholes R. J., M. Walters, E. Turak, H. Saarenmaa, C. H. R. Heip, É. Ó. Tuama, *et al.* 2012. Building a global observing system for biodiversity. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 4(1), 139–146.
- Tarin, T., E. A. Yépez, J. Garatuz Payán, J. C. Rodríguez, L. A. Méndez Barroso, C. J. Watts and E. R. Vivoni. 2020. Evapotranspiration flux partitioning at a multi-species shrubland with stable isotopes of soil, plant, and atmosphere water pools. *Atmósfera*, 33(4), 319–335.
- Tejada-Martínez, A. 1996. Sobre mediciones y parametrizaciones del balance energético y la estabilidad atmosférica en la Ciudad de México. Tesis para grado de Doctor en Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México. México. Recuperado de <https://repositorio.unam.mx/contenidos/72584>.
- Torres-Arreola, R. 2021. Efecto del cambio de uso de suelo a distintos manejos de cultivo de trigo en el balance hídrico en zonas semiáridas de Coahuila de Zaragoza. Tesis para obtener el grado de Maestría en Ciencias en Sustentabilidad de los Recursos Naturales y Energía. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN, Unidad Saltillo, México. 68 pp.

- Uuh-Sonda, J. M., H. A. Gutiérrez Jurado, B. Figueroa Espinoza and L. A. Méndez Barroso. 2018. On the ecohydrology of the Yucatan Peninsula: Evapotranspiration and carbon intake dynamics across an eco-climatic gradient. *Hydrological Processes*, 32: 2806–2828. <https://doi.org/10.1002/hyp.13230>.
- Vargas, R., E. A. Yépez, J. L. Andrade, G. Ángeles, T. Arredondo, A. E. Castellanos, *et al.* 2013. Progress and opportunities for monitoring greenhouse gases fluxes in Mexican ecosystems: the MexFlux network. *Atmósfera*, 26(3), 325-336.
- Vargas, R., D. Alcaraz Segura, R. Birdsey, N. A. Brunsell, C. O. Cruz Gaistardo, B. de Jong, *et al.* 2017. Enhancing interoperability to facilitate implementation of REDD+: case study of Mexico. *Carbon Management*, 8(1), 57-65.
- Vargas-Terminel, M. L., J. C. Rodríguez, C. A. Robles Zazueta, E. A. Yépez, R. Vargas, C. J. Watts and J. Garatuza Payán. 2016. Net carbon dioxide ecosystem exchange in contrasting mangroves from Northwest Mexico. En Paz, F. y R. Torres (Eds). 2016. Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2016. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono en colaboración con la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Texcoco, Estado de México, México. ISBN 978-607-96490-4-3. 732 p.
- Van Dam, B., P. Polsenaere, A. Barreras Apodaca, C. Lopez, Z. M. Sánchez Mejía, T. Tokoro, *et al.* 2021. Global trends in air-water CO₂ Exchange Over Seagrass Meadows Revealed by Atmospheric Eddy Covariance. *Global Biogeochemical Cycles*, 35(4).
- Velasco, E., S. Pressley, E. Allwine, H. Westberg and B. Lamb. 2005. Measurements of CO₂ fluxes from the Mexico City urban landscape. *Atmospheric Environment* 39(38), 7433-7446.
- Velasco, E., S. Pressley, R. Grivicke, E. Allwine, T. Coons, W. Foster, *et al.* 2009. Eddy covariance flux measurements of pollutant gases in urban Mexico City. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(19), 7325-7342.
- Velasco, E., R. Perrusquia, E. Jiménez, F. Hernández, P. Camacho, S. Rodríguez, A. Retama and L. T. Molina. 2014. Sources and sinks of carbon dioxide in a neighborhood of Mexico City. *Atmospheric Environment* 97, 226-238.
- Verduzco, V. S., E. V. Vivoni, E. A. Yépez, J. C. Rodríguez, C. J. Watts, T. Tarin, J. Garatuza 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*. <https://doi.org/10.1002/2017jg004361>.
- Villarreal, S., R. Vargas, E. A. Yépez, J. S. Acosta, A. Castro, M. Escoto Rodríguez, *et al.* 2016. Contrasting precipitation seasonality influences evapotranspiration dynamics in water-limited shrublands. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 121(2), 494-508.
- Villarreal, S., M. Guevara, D. Alcaraz Segura and R. Vargas. 2019. Optimizing an environmental observatory network design using publicly available data. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 124(7), 1812-1826.
- Villarreal, S. and R. Vargas. 2021. Representativeness of FLUXNET sites across Latin America. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 126(3).
- Wood, P. J., D. M. Hannah, P. Jonathan and J. P. Sadler. 2008. Hydroecology and ecohydrology: past, present and future. John Wiley & Sons. 464 p.

