



# Revisión cienciométrica (1990-2022) del ciclo del carbono y los flujos de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> de manglares

## Scientometric review (1990-2022) of the carbon cycle and CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> fluxes from mangroves

Judith Vázquez-Benavides<sup>1</sup>, Ma. Susana Alvarado-Barrientos<sup>2\*</sup> y María del Rosario Pineda-López<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidad Veracruzana. Instituto de Biotecnología y Ecología Aplicada. Posgrado en Biotecnología y Ecología Aplicada. Xalapa, Veracruz, México.

<sup>2</sup> Instituto de Ecología, A.C. Red de Ecología Funcional. Xalapa, Veracruz, México.

\* Autora de correspondencia:  
susana.alvarado@inecol.mx

<sup>3</sup> Universidad Veracruzana. Centro de Ecoalfabetización y Diálogo de Saberes. Xalapa, Veracruz, México.

### RESUMEN

Los manglares son ecosistemas costeros estratégicos frente al cambio climático, pero aún existen vacíos de conocimiento sobre la dinámica del gran reservorio de carbono que contienen. Se presenta un análisis cienciométrico sobre el ciclo del carbono en manglares, con especial interés en los flujos de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>. El término “carbono azul” es actualmente distintivo de la literatura científica, sobresaliendo como palabra clave en publicaciones de 380 revistas. La geografía de dicha revisión muestra que la mayoría de las publicaciones presentan resultados de estudios en sitios localizados en China (160), seguido por Indonesia (128), India (92), Australia (78) y EE. UU. (62). Las publicaciones con sitios de estudio en Latinoamérica representan 15% (114), en las que resaltan Brasil (52) y México (44). A pesar de que las publicaciones sobre flujos de carbono aumentaron en los últimos años, los estudios enfocados a los almacenes siguen siendo los más numerosos (68%). De las publicaciones sobre flujos, más de 70% registran flujos verticales (i.e. con la atmósfera) del suelo (inundado o no), y los sitios conservados fueron los más estudiados. Dada la necesidad imperante de comprender el potencial de mitigación del cambio climático que tienen los manglares, es importante incrementar el estudio de flujos laterales y verticales bajo un enfoque multiescalar y en diversos contextos costeros, dando especial atención a manglares en restauración bajo diferentes legados de degradación. Abordar estos vacíos en la comunicación escrita científica es crucial para la toma de decisiones sobre la conservación y restauración de manglares.

**PALABRAS CLAVE:** cambio climático, carbono azul, ecosistemas costeros, emisiones, gases de efecto invernadero, humedales.

### ABSTRACT

Mangroves are strategic coastal ecosystems in the face of climate change. However, fundamental knowledge gaps remain, regarding the dynamics of the large carbon reservoir these ecosystems contain. A scientometric analysis of the carbon cycle of mangroves is presented, with special interest in CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> fluxes. The term “blue carbon” is currently distinctive of the reviewed scientific literature, and 380 journals were found to publish studies generally using this keyword. The geography of the reviewed literature shows that most publications reported results of studies with sites located in China (160), followed by Indonesia (128), India (92), Australia (78), and U.S.A. (62). Publications with study sites located in Latin America represent 15% of the reviewed literature (114), were Brazil (52) and Mexico (46) standout. Although publications regarding carbon fluxes increased during the last years, the studies focused on carbon stocks are still the most numerous (68%). More than 70% of the publications regarding carbon fluxes report soil (flooded or not) vertical fluxes (i.e. with the atmosphere), and conserved mangroves are mostly studied. Given the pressing necessity to comprehend the climate change mitigation potential of mangroves, it is important to increase the study of lateral and vertical carbon fluxes, with a multi-scalar approach and in varied coastal contexts, with special attention to mangroves under restoration with different degradation legacies. Focusing on filling these gaps in the written scientific communication is crucial for decision making of mangrove conservation and restoration.

**KEYWORDS:** climate change, blue carbon, coastal ecosystems, emissions, greenhouse gasses, wetlands.

## INTRODUCCIÓN

El incremento sostenido de las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, tales como el vapor de agua, el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y metano (CH<sub>4</sub>), así como su efecto en la termodinámica atmosférica y el clima global (Schlesinger y Bernhardt, 2013), han motivado durante las últimas décadas estudios sobre el rol de los ecosistemas en el ciclo global del carbono y su influencia en el cambio climático (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2021). Este rol se expresa a través de los procesos ecosistémicos esenciales como la evapotranspiración, la fotosíntesis (asimilación de CO<sub>2</sub>), y la respiración y degradación de materia orgánica (emisión de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>) (Adams, 2010).

Los ecosistemas marinos y humedales costeros, especialmente los manglares, han recibido considerable atención en diversos foros, tanto científicos como políticos, sobre las estrategias de mitigación y adaptación a la crisis climática (Duarte et al., 2013; Macreadie et al., 2021; Wedding et al., 2021). Por un lado, los ecosistemas de manglar brindan servicios ambientales que contribuyen a la adaptación de la sociedad hacia algunos de los efectos más catastróficos del cambio climático, como el incremento de la intensidad y ocurrencia de tormentas (Elsner et al., 2008); ya que sirven como barreras contra los vientos, tormentas tropicales y huracanes (Huxham et al., 2017), y pueden almacenar grandes cantidades de agua conteniendo inundaciones (Menéndez et al., 2020). Por otro lado, los manglares son considerados ecosistemas clave en la mitigación de las emisiones de GEI por su balance neto positivo de carbono, es decir, capturan más carbono de la atmósfera del que emiten de vuelta.

El carbono almacenado en los manglares, así como el de otros ecosistemas costeros y marinos, ha cobrado gran relevancia y se le ha denominado como “carbono azul” para diferenciarlo del almacenado en ecosistemas terrestres (Nellemann et al., 2009). Además, en la comunicación pública de la ciencia del carbono azul se les ha considerado a los manglares como “superhéroes” contra el cambio climático (Cadena y Ochoa-Gómez, 2023). De

hecho, el promedio mundial de productividad neta del ecosistema (NEP, por sus siglas en inglés), derivado de observaciones directas del intercambio neto de carbono entre el manglar y la atmósfera, es de 567 g C m<sup>-2</sup> año<sup>-1</sup> (Fig. 1), lo que los convierte en uno de los sumideros de carbono más grandes del mundo (Keenan y Williams, 2018; Fig. 1a).

Este balance positivo resulta de asimilar de la atmósfera una importante cantidad de CO<sub>2</sub> (productividad primaria bruta observada: 974 g C m<sup>-2</sup> año<sup>-1</sup>-2784 g C m<sup>-2</sup> año<sup>-1</sup>; Rosentreter et al., 2023). Mientras que sus tasas de respiración son relativamente bajas (intervalo observado a escala de ecosistema: 900 g C m<sup>-2</sup> año<sup>-1</sup>-1960 g C m<sup>-2</sup> año<sup>-1</sup>; Rodda et al., 2022); debido a que generalmente el suelo permanece en condiciones anaerobias la mayor parte del tiempo (Lu et al., 2017). El resultado de estos procesos es una de las mayores acumulaciones de carbono en el suelo (467 Mg ha<sup>-1</sup> ± 118 Mg ha<sup>-1</sup> en promedio; Alongi, 2014; Jennerjahn, 2020) y relativamente estable por largos períodos de tiempo (Adame et al., 2021). Esto convierte a los manglares en los ecosistemas más densos en carbono (Donato et al., 2011) con un importante potencial para mitigar el cambio climático.

Paradójicamente, los ecosistemas de manglar también están entre los ecosistemas más vulnerables a los efectos del cambio climático, como el aumento del nivel del mar y el aumento de la temperatura, así como a disturbios naturales o antropogénicos que alteran su régimen hidrológico y sus funciones (Calderón-Aguilera et al., 2012). Estos disturbios pueden modificar la salinidad y disponibilidad de nutrientes (Alongi, 2014; Moreno-Casasola et al., 2016; Cinco-Castro y Herrera-Silveira, 2020), lo cual a su vez modula la variabilidad de los flujos de carbono de los manglares y definen su potencial como sumideros de carbono (Bouillon et al., 2008; Rodda et al., 2022).

El acervo de investigaciones científicas sobre el ciclo de carbono en general, y el carbono azul en particular, está en fase de crecimiento acelerado (Zhi et al., 2015; Quevedo et al., 2023). Recientes análisis bibliométricos



indican que los manglares son los ecosistemas de carbono azul más estudiados en comparación con marismas y pastos marinos (Jiang et al., 2022; Duarte-de Paula Costa y Macreadie, 2022). Pero, el incremento de las publicaciones que examinan detalladamente los procesos del ciclo del carbono en manglares ocurrió a partir del inicio del presente siglo (Cummings y Shah, 2017).

Las revisiones bibliométricas sobre manglares o carbono azul publicadas en los últimos años (por ej. Duarte-de Paula Costa y Macreadie, 2022; Quevedo et al., 2023) proveen aportes generalizados, pero no profundizan en los flujos de carbono, es decir, sobre el intercambio de carbono entre diferentes almacenes o reservorios por unidad de área y tiempo (Adams, 2010). Además, nin-

guna de estas revisiones recientes ha sido publicada en español, a pesar de que una gran parte de la extensión de manglares se localiza en países hispanohablantes (Giri et al., 2011). Aunque existen diferencias entre los estudios bibliométricos y cienciométricos, ambos tipos de análisis de la literatura permiten analizar cuantitativamente la producción científica para obtener tendencias, patrones, relaciones e indicadores del desarrollo de cierto campo del conocimiento (Michán y Muñoz-Velasco, 2013). Siendo la ciencimetría una herramienta que permite señalar los vacíos en la generación del conocimiento en diferentes (sub)disciplinas, así como las fronteras de investigación de un tema en un contexto ecológico, social y económico actual (Millán et al., 2017).

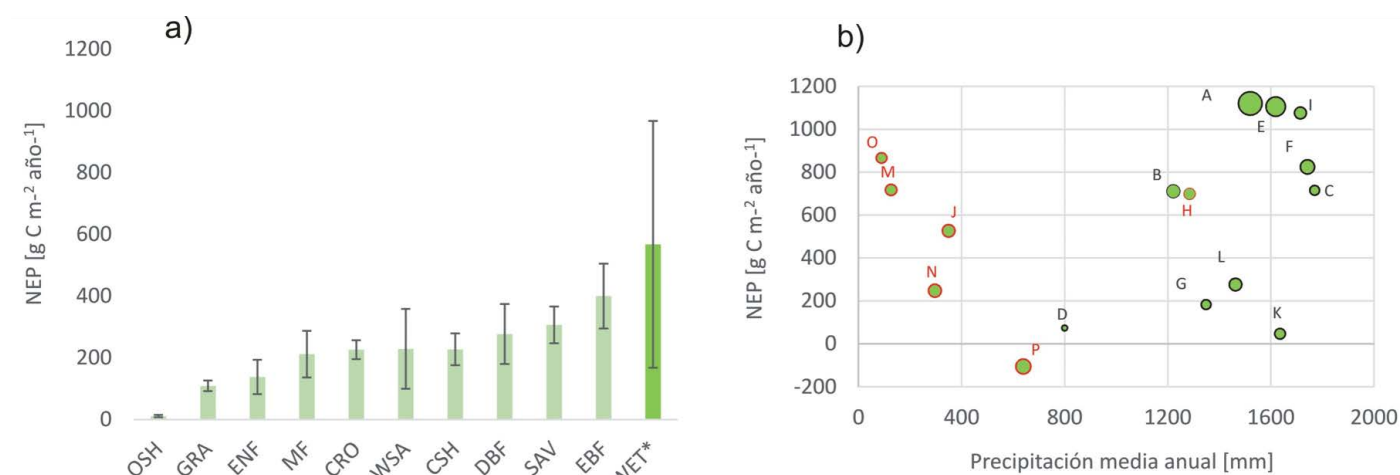


FIGURA 1. a) Promedio anual ( $\pm$  desviación estándar) de la producción neta del ecosistema (NEP) derivados de observaciones con la técnica covarianza de vórtices (Keenan y Williams, 2018) representados por el tipo funcional de la vegetación. b) Relación entre NEP y precipitación media anual de 15 sitios de manglar, en rojo se destacan los sitios ubicados en Latinoamérica (todos en México) y el tamaño del círculo representa la altura relativa del dosel.

OSH = matorrales abiertos, GRA = pastizales, ENF = bosques siempreverdes de coníferas, MF = bosques mixtos, CRO = agricultura anual, WSA = sabana arbórea, CSH = matorrales cerrados, DBF = bosques deciduos de hoja ancha, SAV = sabana, EBF = bosques siempreverdes de hoja ancha, WET\* = manglares mostrados en (b).

A: Barr et al. (2010), B y C: Chen et al. (2014), D: Leopold et al. (2016), E: Cui et al. (2018), F: Liu y Lai (2019), G: Gnanamoorthy et al. (2020), H: Alvarado-Barrientos et al. (2021), I: Zhu et al. (2021), J: Granados-Martínez et al. (2021), K: Zhao et al. (2022), L: Rodda et al. (2022), M y N: Vargas-Terminel et al. (2023), O: Uribe-Horta (sin publicar), P: Uuh-Sonda et al. (2023).

## OBJETIVOS

Examinar las características geográficas y de generación del conocimiento de la literatura científica internacional sobre el ciclo del carbono, y los flujos de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>, en manglares durante el período de 1990-2022.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Para este trabajo, los flujos verticales fueron definidos como el intercambio de carbono entre distintos componentes del ecosistema y la atmósfera, tales como las emisiones de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> desde la vegetación o desde el suelo (inundado o no), la asimilación de CO<sub>2</sub> a escala de hoja o planta, y el intercambio neto a escala de ecosistema. Y los flujos horizontales o laterales son el intercambio de carbono entre ecosistemas adyacentes y el manglar, tales como la exportación de carbono disuelto o particulado mediante las entradas y salidas del agua al humedal. Finalmente, procesos como la descomposición de materia orgánica y la caída de hojarasca fueron considerados como flujos en general al ser procesos intermedios tanto de flujos laterales como verticales (Fig. 2).

Se utilizaron los buscadores de bases de datos especializadas en literatura científica internacional de *Web of Science* y *Scopus*, con el algoritmo: ["carbon cycle" or "carbon cycling" and mangroves]; siendo estos términos vinculados al título, resumen y palabras clave del artículo. El período de búsqueda fue 1990-2022. Adicionalmente, se realizaron búsquedas complementarias con los siguientes algoritmos: [emission or fluxes or "CO<sub>2</sub>" and "CH<sub>4</sub>" and mangroves], ["carbon stock" or "carbon pool" or "carbon storage" and mangroves], ["horizontal fluxes" or "carbon export" or "horizontal" and mangroves]. Se eliminaron los artículos duplicados y aquellos que no tuvieran relación con los objetivos de este trabajo. La base de datos final quedó conformada por un total de 1215 publicaciones.

Cada uno de los artículos de la base de datos fue revisado para completar la información correspondiente a: el tipo de estudio según el origen de los datos (primarios, aquellos de fuentes originales; o secundarios, los que utilizan datos de otras publicaciones). Luego, sólo

para los estudios primarios se incluyeron los siguientes campos: país donde se realizó el estudio, componente del ciclo de carbono estudiado (R = reservorios, F = flujos, RyF = reservorios y flujos, O = otros). Para los estudios F y RyF se especificó el flujo estudiado. Para los artículos sobre flujos verticales se identificó también el estado del manglar (conservado, perturbado, o restaurado), el tipo de perturbación (cuando fuera el caso), el gas estudiado (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, o ambos), y los principales resultados.

La base de datos fue analizada con Microsoft Excel (Office 2010). La nube de palabras clave se realizó con el generador libre WorldClouds (Zygomatic, 2024). Se utilizaron los softwares Litmaps (Litmaps Ltd., 2023) y Dimensions (Hook et al., 2018) para encontrar los artículos más influyentes de los temas "blue carbon" y "mangrove". Para la realización del mapa de distribución geográfica se utilizó el programa QGIS (versión 3.22.7).

## RESULTADOS

### Características generales de la literatura sobre carbono de manglares

Se registraron 1215 publicaciones, de las cuales, 988 corresponden a artículos que presentan datos originales y 227 a síntesis de literatura (revisiones y metaanálisis), notas cortas, cartas, y estudios biblio(ciencia) métricos. Como ha sido mencionado en revisiones de literatura anteriores (por ej. Quevedo et al., 2023), el número de publicaciones sobre el carbono de manglares ha crecido exponencialmente desde 2009 (Fig. 3), a partir de la aparición del concepto de "carbono azul" (Nelleman et al., 2009). La figura 3 resalta los años en los que fueron publicados los cinco artículos considerados como los más influyentes (por ser extremadamente citados) de la ciencia del carbono azul, como Mcleod et al. (2011) y Pendleton et al. (2012). Tres de ellos están enfocados en los ecosistemas de manglar: Kristensen et al. (2008) analizan y discuten sobre la dinámica del carbono orgánico, Donato et al. (2011) cuantifican el almacén de carbono en la región Indo-Pacífico y Alongi (2014) estima las transferencias y el secuestro de carbono.

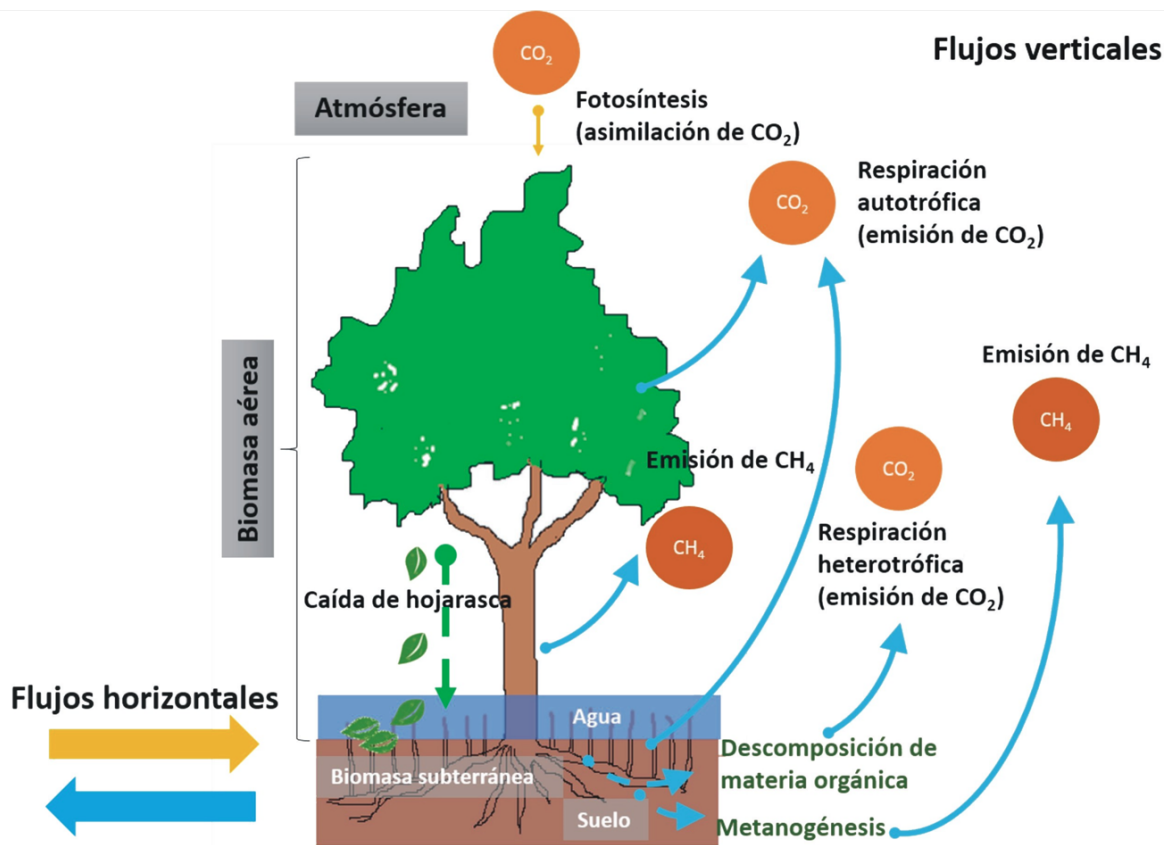


FIGURA 2. Diagrama general del ciclo del carbono en manglares.

Los reservorios de carbono están representados con cajas y los flujos con flechas. Los flujos verticales (intercambio con la atmósfera) se muestran con flechas delgadas, mientras los flujos laterales (intercambio con otros ecosistemas) se muestran con flechas gruesas. Flujos o procesos intermedios se presentan con flechas discontinuas. El color celeste (o azul) y amarillo corresponde a salidas y entradas al ecosistema, respectivamente.

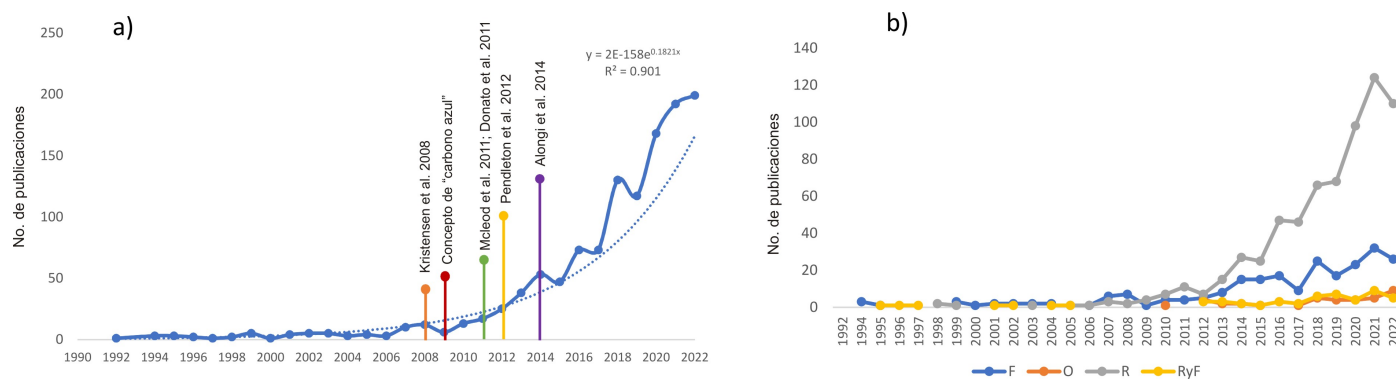


FIGURA 3. (a) Número de publicaciones por año sobre el ciclo del carbono en manglares. (b) Número de publicaciones por año de los diferentes componentes del ciclo del carbono.

Están marcados los cinco artículos más influyentes de la ciencia del carbono azul. F = flujos, R = reservorios, RyF = Reservorios y flujos, O = otros.

Los estudios del ciclo del carbono de manglares fueron publicados en 380 revistas científicas, las cuales abarcan una importante variedad de alcances y disciplinas, ya que se encontró que 69 revistas publicaron dos estudios, mientras que en 207 revistas se publicó solamente uno. En la figura 4 se muestran las primeras 20 revistas con más publicaciones. El primer lugar está ocupado por la revista *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, y en segundo lugar se encuentra la revista *Science of the Total Environment*; esta última con un enfoque integral más que disciplinar.

En total, 5829 palabras clave fueron contabilizadas, siendo las más frecuentes “blue carbon”, “climate change” y “carbon stock” (Fig. 4b). Las palabras clave relacionadas a los reservorios de carbono fueron más frecuentes que las relacionadas a los flujos verticales o emisiones de GEI, como “soil organic carbon” o “carbon stock” (156) vs “carbon dioxide” o “methane” (86). Además, las palabras clave más frecuentes han ido cambiando a través del tiempo. En la década de 1990 las palabras clave fueron tan diversas que no sobresalió ninguna en particular. En

el período 2000-2009 aparecieron por primera vez las palabras: “cambio climático”, “carbono azul”, y “secuestro de carbono”, mientras que en la década 2010-2019 se registró un aumento de su frecuencia. En 2020-2022 aparecieron más palabras relacionadas con el carbono azul como: “blue carbon storage”, “blue carbon strategy”, “blue carbon ecosystems”.

## Geografía de las publicaciones científicas sobre el carbono de manglares

En cuanto a la distribución geográfica de los sitios de estudio registrados en la literatura revisada se encontraron 62 países. China fue el país donde se ubicó la mayoría de los sitios de estudio (160), seguido por Indonesia (128), India (92), Australia (78) y EE. UU. (62) (Fig. 5). Las publicaciones con sitios de estudio en Latinoamérica representan en conjunto 15%, resaltando Brasil (52) y México (44). Los otros países representados son: Colombia (18), Ecuador (8), Venezuela (7) y Guyana Francesa (5), y otros países con menos de tres artículos. Un total de 44 publicaciones docu-

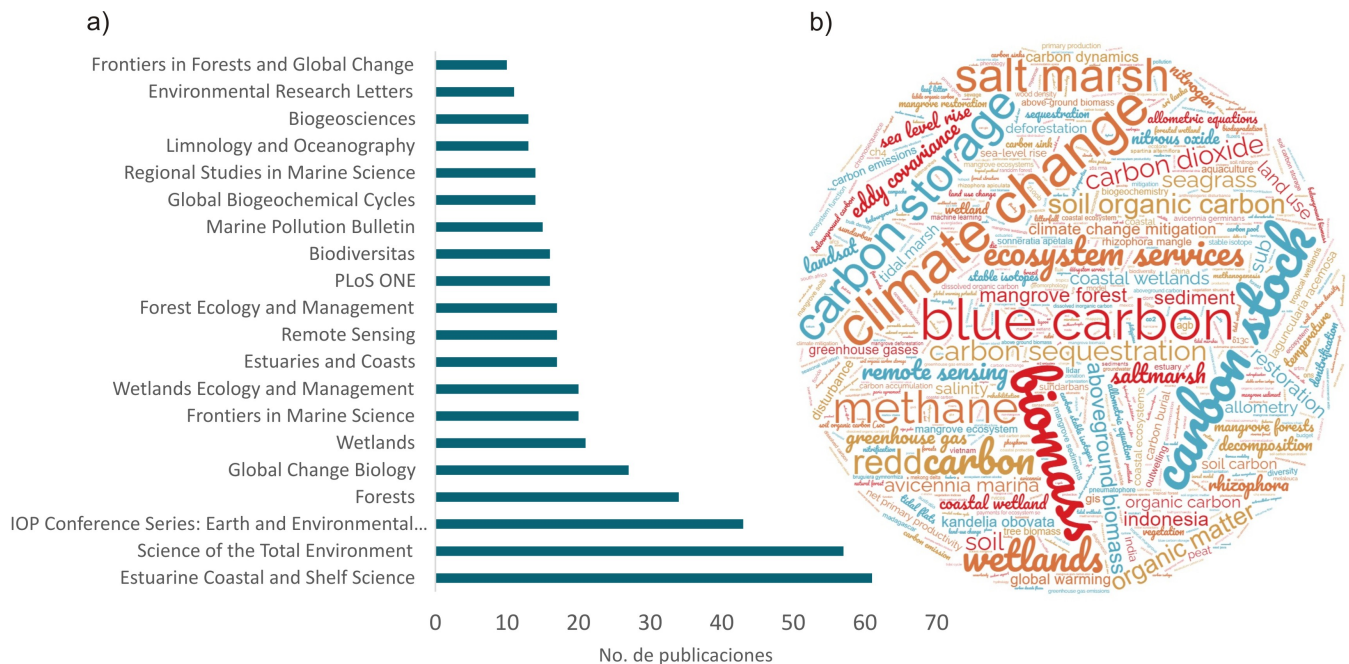


FIGURA 4. a) Revistas que contienen la mayoría de las publicaciones sobre el ciclo del carbono en manglares. Se muestran las primeras 20. b) Nube de palabras clave de las publicaciones revisadas.

La nube de palabras excluye las usadas en la primera búsqueda: "carbon cycle", "carbon cycling" y "mangroves".



mentan sitios de estudio ubicados en más de un país. Al analizar los estudios según el país de afiliación de los autores principales, China sigue estando en primer lugar, seguido por Australia, India y EE. UU. Países europeos como Alemania, Francia, Bélgica, Dinamarca y Reino Unido figuran en estudios desarrollados en países con manglares como Indonesia, Vietnam, Tailandia, Singapur, Nueva Caledonia, Tanzania, Kenya, Ecuador y Brasil.

Al clasificar las publicaciones según el componente del ciclo de carbono estudiado, se encontró que 667 fueron enfocadas en los almacenes (68%), 231 fueron dedicadas a los flujos (23%), y 52 fueron estudios con ambos componentes (5%). Solo 38 estudios (4%) fueron enfocados en microorganismos o macrobentos del suelo inundado y sus rutas metabólicas relacionadas con el ciclo del carbono. En general, estas mismas tendencias se presentaron en todos los continentes (Fig. 6).

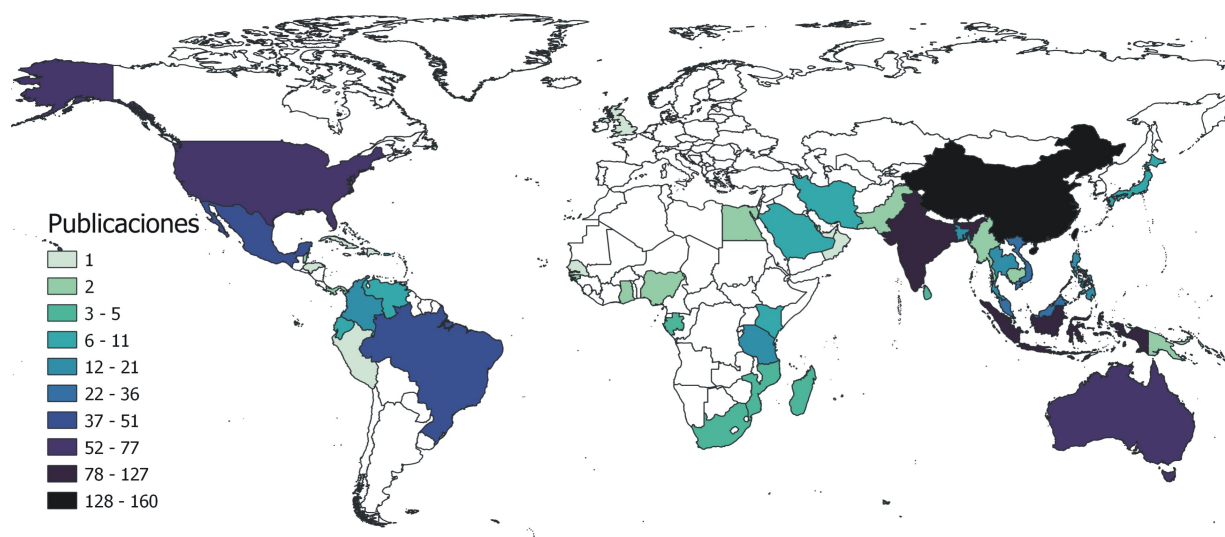


FIGURA 5. Distribución geográfica de la ubicación del sitio de estudio referido en las publicaciones revisadas (n = 988).

Un total de 44 publicaciones (4.45%) no se muestran en el mapa debido a que corresponden a sitios multinacionales o globales.

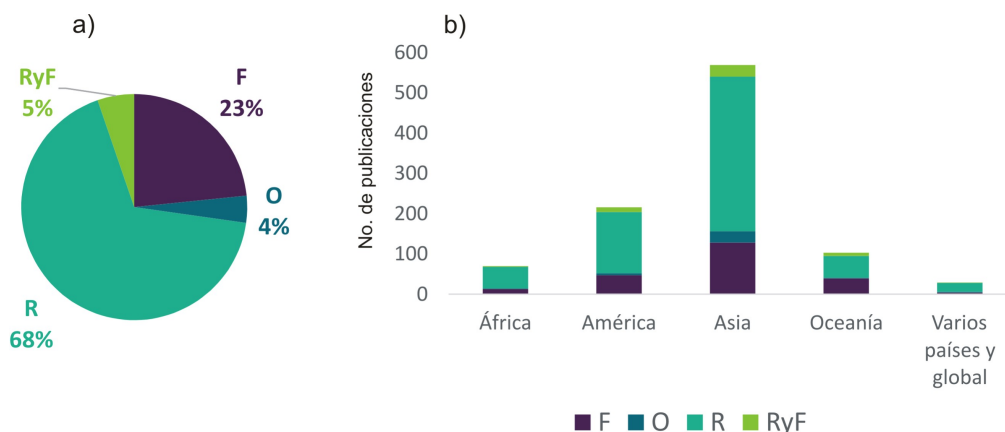


FIGURA 6. (a) Distribución de las publicaciones por componente del ciclo del carbono estudiado en manglares. (b) Distribución geográfica continental de las publicaciones revisadas.

F = flujos, R = reservorios, RyF = Reservorios y flujos, O = Otros.



### Publicaciones sobre flujos de carbono

De las publicaciones sobre flujos, las dedicadas a los verticales fueron la mayoría (63%), seguido de los laterales (24%), mientras que los estudios de ambos flujos solamente representaron 10% (Fig. 7a). Los estudios de flujos verticales han aumentado más a lo largo de los años que los laterales (Fig. 7b). De las publicaciones sobre flujos verticales, se encontró que los estudios que contemplan el

flujo de ambos gases (CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>) son los más frecuentes, seguido de los enfocados al flujo de CH<sub>4</sub>, y por último a los del flujo de CO<sub>2</sub> (Fig. 8a). La mayoría de las publicaciones sobre flujos corresponden a componentes individuales del ecosistema abarcando escalas espaciales de unos centímetros cuadrados, por ejemplo, los estudios de respiración del suelo o emisiones de CH<sub>4</sub> (Fig. 8a). Los estudios de flujos verticales a escala de ecosistema, que abarcan

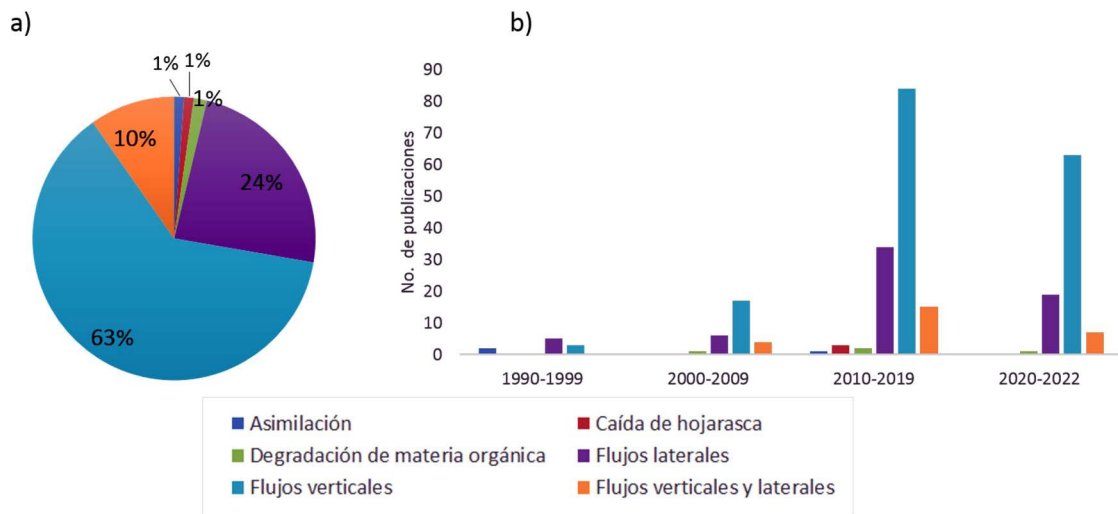


FIGURA 7. (a) Distribución porcentual de los flujos de carbono investigados en las publicaciones analizadas.

(b) Distribución temporal de los flujos de carbono estudiados.

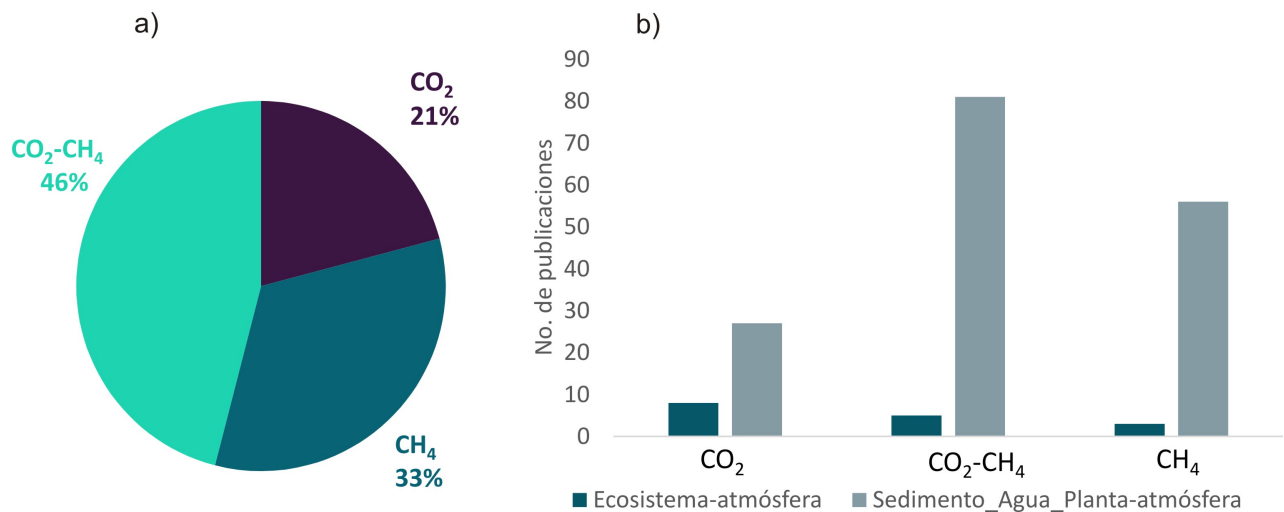


FIGURA 8. (a) Distribución de los GEI investigados en las publicaciones de flujos verticales. (b) Número de publicaciones de flujos verticales según la superficie o escala espacial estudiada.





cientos de metros cuadrados, siguen siendo pocos (Fig. 1b y 9b). Por otro lado, la mayoría de los estudios de flujos verticales se han realizado en manglares conservados, seguido por los que involucran sitios tanto conservados como perturbados (por ej., cuando el sitio conservado se usa como referencia). En menor cantidad se encuentran los estudios que involucran sitios bajo restauración o construidos (Fig. 9a). La causa de perturbación más frecuentemente hallada en los estudios sobre flujos verticales en manglares perturbados o bajo restauración, es la contaminación por descarga de aguas residuales (urbanas e industriales), seguido por el cambio en el uso del suelo, y por último se encuentran las especies invasoras, la acuicultura, y la alteración de la dinámica hidrológica (Fig. 9b).

En cuanto al objetivo de las publicaciones sobre flujos verticales, se encontró en primer lugar cuantificar los flujos y sus patrones espaciotemporales, así como determinar los principales factores que controlan su variabilidad. Regularmente este objetivo es el de estudios en sitios conservados. En segundo lugar, conocer el efecto de alguna perturbación antrópica o natural (como huraca-

nes) sobre la magnitud del intercambio de carbono entre el suelo o ecosistema y la atmósfera. En tercer lugar, evaluar el efecto de algún factor independientemente de otros sobre los flujos verticales, por lo que son llevados a cabo en condiciones experimentales controladas (i.e. en laboratorio, invernadero, humedales construidos) o modelos computarizados. Estos estudios evalúan, por ejemplo, algún efecto del cambio climático como el aumento del nivel del mar, aumento de temperatura o aumento de salinidad.

Las variables ambientales que más se miden concurrentemente con los flujos verticales, y que usualmente se examinan como controles su magnitud, fueron la salinidad (del agua intersticial y superficial), la temperatura (del agua, suelo, o aire), nutrientes, potencial redox, y la densidad aparente del suelo. Con menor frecuencia se cuantifica la diversidad o función metabólica de los microorganismos que participan en el ciclo del carbono.

Algunos hallazgos sobresalientes sobre los controles biofísicos de los flujos de  $\text{CO}_2$  y  $\text{CH}_4$  en suelos de sitios conservados y perturbados se sintetizaron en las tablas 1 y 2.

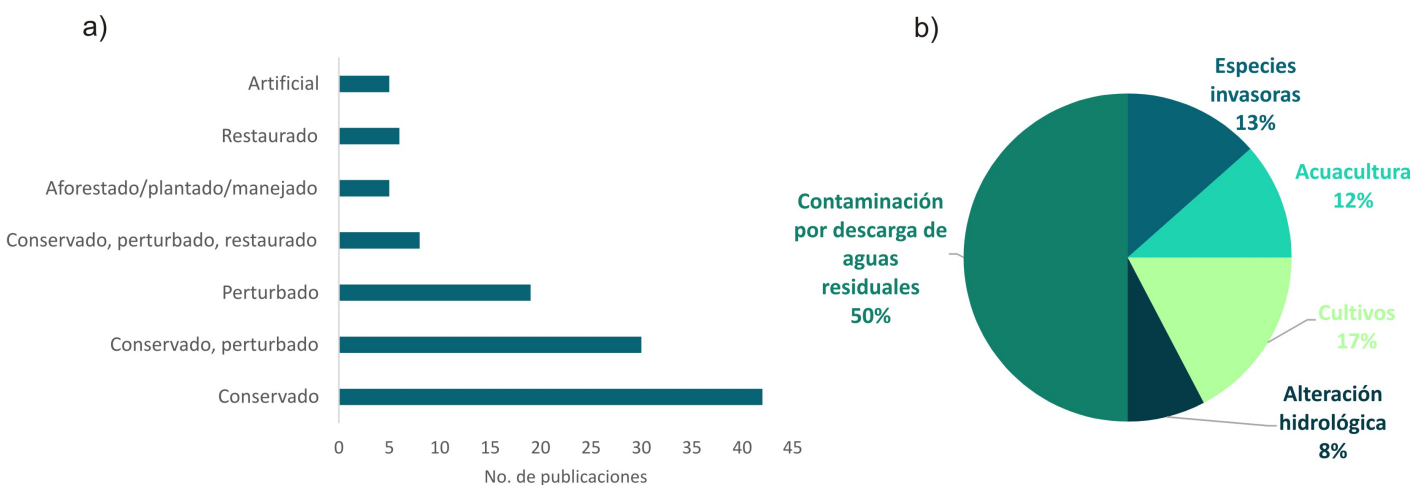


FIGURA 9. (a) Número de publicaciones sobre flujos verticales según la condición del manglar estudiado. (b) Principales causas de perturbación registradas en los estudios de flujos verticales de la literatura revisada.

TABLA 1. Principales hallazgos de publicaciones selectas sobre los controles de los flujos de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> en suelo manglares conservados.

<i>Manglares conservados</i>	<i>Referencias</i>
La dinámica de la marea y lluvia controla los flujos de CH <sub>4</sub> y CO <sub>2</sub> .	Barnes et al. (2006); Chen et al. (2014)
La temperatura aumenta las emisiones de CH <sub>4</sub> y CO <sub>2</sub> .	Allen et al. (2007); Yang et al., (2018)
Los flujos de CH <sub>4</sub> y CO <sub>2</sub> presentan una correlación positiva con el número de neumatóforos y madrigueras de cangrejo.	Krithika et al. (2008); Kristensen et al. (2022)
El flujo de CH <sub>4</sub> presenta una correlación negativa con la salinidad.	Dutta et al. (2013); Chauhan et al. (2015); Gao et al. (2021)
Relación positiva del flujo de CO <sub>2</sub> con el oxígeno disuelto y fósforo total del agua.	Yang et al. (2018)
Relación positiva del flujo de CH <sub>4</sub> con fósforo total y amonio; relación negativa con el potencial redox.	Yang et al. (2018); Allen et al. (2007)
La diversidad y actividad funcional de los microorganismos afecta los flujos de CO <sub>2</sub> y CH <sub>4</sub> .	Gao et al. (2020); Gao et al. (2021)

TABLA 2. Principales resultados de estudios selectos sobre flujos de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> del suelo de manglares con distintos tipos de perturbación.

<i>Tipo de perturbación</i>	<i>Principales resultados</i>	<i>Referencias</i>
Contaminación por descarga de aguas residuales	Mayor flujo de CH <sub>4</sub> asociado a entradas de contaminación, independientemente de la salinidad.	Chuang et al. (2017)
	Las emisiones aumentaron significativamente después del riego con aguas residuales.	Chen et al. (2011)
	Las descargas de aguas residuales pueden contener partículas de titanio (TiO <sub>2</sub> ) que promueven la metanogénesis y la emisión de CH <sub>4</sub> .	Ma et al. (2020)
Invasión de especies	Mayores flujos de CO <sub>2</sub> en manglares exóticos que en el manglar nativo.	Sheng et al. (2021)
	La especie invasora <i>Sonneratia apetala</i> aceleró el ciclado de nutrientes, aumentando la comunidad metanogénica.	Yu et al. (2020)
Cambio de uso de suelo	Flujos de CO <sub>2</sub> y CH <sub>4</sub> fueron más altos en el manglar conservado que en manglares convertidos.	Castillo et al. (2017)
	Las emisiones de CH <sub>4</sub> fueron más altas en un cultivo de arroz que en el manglar conservado.	Chauhan et al. (2017)



## DISCUSIÓN

Los estudios sobre el ciclo del carbono en manglares han crecido exponencialmente a partir del concepto de “carbono azul” usado desde el 2009 como distintivo del carbono en ecosistemas costeros, (Nelleman et al. 2009) (Fig.3). Aunque ya desde la década de los noventa se conocía el potencial de estos ecosistemas para la mitigación del cambio climático (Twilley et al., 1992). Actualmente, este conocimiento está siendo nutrido por diversas disciplinas (Fig. 4). Estos resultados coinciden con revisiones bibliométricas anteriores, (Zhi et al., 2015; Duarte-de Paula Costa y Macreadie, 2022; Quevedo et al., 2023; Yin et al., 2023).

### Geografía de las publicaciones científicas sobre el carbono de manglares

Asia es el continente donde se ubican los sitios de estudio de la mayoría de las publicaciones revisadas, tanto las generales sobre el ciclo del carbono en manglares como las específicas sobre los flujos (Fig. 5 y 6b). Esto concuerda con la ubicación de las mayores extensiones de manglares en el mundo (Giri et al., 2011). China fue el país con más sitios de estudio y cuenta con publicaciones sobre manglares desde 1950 (Li y Lee, 1997), que incrementaron sustancialmente a partir del 2008, en gran parte, debido al impulso en inversión pública a causa de la realización de los Juegos Olímpicos (Zhi et al., 2015). Los países de Asia oriental que presentan altas tasas de emisiones de GEI y deforestación (Wang et al., 2020) están intentando revertir esa situación a través de la implementación de proyectos de investigación y restauración, resaltando la importancia de los estudios del ciclo del carbono (Fang et al., 2010; Chen et al., 2023). Además, estos países tienen inversiones importantes en ciencia y tecnología (por ej., China con 2.40% de su PIB en 2020; The World Bank Group, 2024).

La figura 5 muestra la ubicación de los sitios de estudio documentados en la literatura revisada, y no la de los autores principales de las publicaciones, como en revisiones bibliométricas anteriores (Quevedo et al., 2023; Ho y Mukul, 2021; Yin et al., 2023). Al contrastar ambos enfo-

ques, resaltan, en primer lugar, coincidencias de países donde se ubican la mayor parte de los sitios de estudio y autores principales. En este caso, China también lideró las publicaciones por país de afiliación, seguido por Australia, India y Estados Unidos. En contraste, otros países de adscripción de los autores principales no se ajustan con la cantidad de sitios de estudio ubicados en esos países. Por ejemplo, Indonesia, siendo el país con mayor extensión de manglares en el mundo, se encontró en segundo lugar por sitio de estudio (Fig. 5), pero cae hasta los últimos lugares según el país de afiliación del autor principal.

Los sitios de estudio ubicados en Latinoamérica figuraron en 15% de las publicaciones y los países más representativos poseen grandes extensiones de manglar, como Brasil con 962 683 ha y México con 741 917 ha. (Giri et al., 2011). Por otro lado, EE. UU. se posicionó en el quinto lugar de países según los sitios de estudio analizados en la literatura revisada, a pesar de que su extensión de manglares es mucho menor comparado con Brasil y México. Sin embargo, es uno de los países con mayores economías del mundo y el quinto país con mayor inversión de su PIB en ciencia y tecnología (3.45% en 2020; The World Bank Group, 2024). Dada su cercanía geográfica, política y socioeconómica, EE. UU. se identifica como un colaborador mayoritario de estudios llevados a cabo en Puerto Rico, México y Brasil. De igual manera, estudios desarrollados en Asia, Oceanía, y Latinoamérica, frecuentemente cuentan con autores principales con afiliación europea.

La relativa baja participación en la producción de conocimiento científico de Latinoamérica puede ser resultado de la baja inversión en ciencia y tecnología, que fue en promedio de 0.67% en 2019 (The World Bank Group, 2024). Además, las barreras del lenguaje pueden ser una limitación importante para participar en la conversación científica internacional (Drubin y Kellogg, 2012). Una de las limitaciones del presente estudio es que solamente se incluyeron publicaciones de revistas científicas internacionales indizadas en *Web of Science* y *Scopus*, lo cual no refleja fehacientemente la representatividad y el esfuerzo en la generación de conocimiento científico, ni en la conversación formal científica, entre pares de países hispano-

hablantes. Así, no fueron incluidas en el presente estudio las publicaciones del Programa Mexicano del Carbono, que constituyen contribuciones científicas en español desde el 2011. La revisión de Herrera-Silveira y Teutli-Hernández (2017), publicada en español y enfocada en los estudios realizados en México, encontró tendencias similares a las observadas aquí, excepto que no había para entonces publicaciones sobre flujos verticales.

El papel de científicos y tecnólogos de países latinoamericanos, y en general del Sur Global (Dados y Connell, 2012), podría considerarse mayoritariamente en el ámbito de la colecta de muestras y observaciones, y proveyendo conocimientos locales, pero no liderando la discusión científica. A este fenómeno se le ha llamado “ciencia helicóptero” (Adame, 2021). Esto tiene consecuencias sobre qué temas y enfoques de investigación son priorizados en los países con extensiones importantes de manglar. Así mismo, influye en la prioridad que se le dé a la difusión de la ciencia e incidencia para la generación y aplicación de políticas públicas relevantes a la conservación y restauración de manglares (Herrera-Silveira y Teutli-Hernández, 2017). Considerando esto, es importante desarrollar una verdadera colaboración internacional, dado que la crisis climática es un tema global. Para ello, es preciso reforzar las relaciones político-económico-ambiental y científico entre los países (Fang et al., 2010).

### Presente y futuro de los estudios de flujos de carbono de manglares

Los esfuerzos científicos se han enfocado más en conocer y cuantificar los almacenes de carbono de los manglares, mientras que estudios sobre los flujos siguen siendo relativamente escasos (Fig. 3b). Otros autores señalan el mismo patrón (Zhi et al., 2015; Yin et al., 2023). En consecuencia, se ha generado una imagen incompleta sobre la dinámica del carbono en ecosistemas de manglar, incluso representada en diagramas conceptuales del ciclo del carbono que permean la comunicación entre científicos, practicantes, y el público en general. Por ejemplo, en algunos diagramas no se muestra el flujo de CH<sub>4</sub> en manglares

conservados (ver, Cisneros-de la Cruz et al., 2021), a pesar de que generalmente es un flujo sustancial (Rosentreter et al., 2018) y que el efecto del CH<sub>4</sub> como GEI es mayor que del CO<sub>2</sub> (Yoro y Daramola, 2020). A pesar de esto, los estudios sobre flujos tanto verticales como laterales están incrementado en la presente década (Fig. 1b y 7b), lo cual contribuye en cerrar los vacíos en el conocimiento del presupuesto de carbono de los manglares señalados por Rivera-Monroy et al. (2013). Otros autores como Macreadie et al. (2019), también mencionan que el futuro de la ciencia del carbono azul debe enfocarse en cuantificar los flujos para comprender plenamente su potencial de mitigación del cambio climático.

Cabe resaltar que, en las estimaciones iniciales del balance de carbono de los manglares, utilizadas para cuantificar su función como sumideros de carbono (por ej., Bouillon et al., 2008), se contaba con más datos y conocimiento sobre los almacenes, pero no se incorporaban datos suficientes (ni muy precisos) de flujos de carbono con la atmósfera o con ecosistemas adyacentes. Por esta razón no se tenían en cuenta situaciones que contradicen el paradigma de que los manglares son siempre grandes sumideros de carbono. Ahora se tiene evidencia de que los manglares pueden ser emisores netos de carbono en algunas circunstancias, como en el caso de manglares de cuenca durante períodos prolongados de no inundación (Alvarado-Barrientos et al., 2021; Uuh-Sonda et al., 2023), al igual que lo observado en otros ecotipos de manglar durante la época seca (Zhu et al., 2021). Esto quiere decir que los manglares de forma dinámica pueden comportarse como fuentes o sumideros de carbono.

A pesar de que los estudios de flujos ecosistema-atmósfera aún son escasos, con las observaciones generadas hasta la fecha con la técnica de covarianza de vórtices, que permite conocer directamente el intercambio neto de carbono atmosférico entre el manglar y la atmósfera (Tarin-Terrazas et al., 2022), se comprueba que los manglares están entre los ecosistemas más productivos del planeta (Fig.1a). Esto es tanto por su alta productividad primaria como por su baja respiración ecosistémica, pero



existe una enorme variabilidad en la magnitud del sumidero (Fig. 1b). Avances importantes muy recientes en este sentido provienen de estudios realizados en sitios ubicados en México, destacando observaciones de manglares de regiones más secas y salinas en comparación con los que habían sido previamente estudiados (Fig. 1b). Es importante mencionar que, si bien que esta técnica es precisa y da información integrada a escala del ecosistema, también su costo es muy elevado. Esta limitante es muy importante para países del sur global, como los de Latinoamérica, por lo que resulta crucial establecer colaboraciones internacionales. Además, es importante complementar las observaciones del intercambio neto de carbono a escala de ecosistema con estudios detallados a escalas menores para comprender integralmente el funcionamiento de los manglares.

Los resultados del presente estudio indican que los flujos de  $\text{CH}_4$  se han estudiado a la par que los de  $\text{CO}_2$ , sin embargo, no de manera multiescalar o integral a escala de ecosistema, sino por compartimentos separados. De estos destacan los estudios de las emisiones de GEI del suelo del manglar (inundado o no) (Fig. 8). Los flujos de  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$  del suelo son muy variables tanto en los diferentes ecotipos de manglar como en distintas condiciones ambientales y contextos costeros (Hernández, 2010; Hernández y Junca-Gómez et al., 2020; Rosentreter et al., 2023). Lo anterior dificulta su comprensión dentro del ciclo del carbono, establecer generalidades y su gestión (Xu et al., 2020), por lo que aún faltan estudios de flujos de carbono en manglares con distintos tipos de perturbación y en sitios en restauración para comprender más a fondo las variaciones en los procesos y reservorios del ciclo del carbono en estos ecosistemas costeros. Esta falta de estudios se reflejó en esta revisión, ya que la condición del manglar más estudiada fue la de los sitios conservados.

Otros campos de estudio que se encuentran en crecimiento son los referentes a los microorganismos en el suelo y su función en el ciclo del carbono, ayudado con técnicas moleculares, así como estudios de la dinámica del carbono con modelos computarizados.

## CONCLUSIONES

Existe un creciente interés mundial por el estudio de ciclo del carbono en los manglares, ya que son considerados como una estrategia para enfrentar la crisis climática global actual. Es importante estrechar colaboraciones internacionales para incrementar estudios que contribuyan a la conservación y restauración de manglares en países del sur global. El concepto del carbono azul es distintivo de las publicaciones sobre el carbono de manglares, y ha homogenizado el cuerpo de literatura científica, así como enfocado los esfuerzos en cuantificar y entender más los reservorios dentro del ecosistema que los flujos de carbono del ecosistema con la atmósfera y con otros ecosistemas adyacentes como los marinos.

Por lo tanto, hacia el futuro, es necesario: i) aumentar los estudios de flujos de carbono en manglares, abarcando lo más posible la variación de ecotipos y contextos costeros, incluyendo sitios en restauración con distintos legados de degradación; ii) continuar con la operación, y ampliar la distribución geográfica de observatorios de flujos ecosistémicos como los que proveen datos presentados en la Fig. 1.; iii) integrar observaciones de flujos horizontales y verticales de manera multiescalar en esos sitios altamente instrumentados; iv) profundizar en el conocimiento de flujos verticales a escala suelo-atmósfera integrando las funciones metabólicas de los microorganismos; y, v) mejorar el traslado del conocimiento científico sobre el carbono en manglares hacia políticas públicas y practicantes de la conservación y restauración de manglares (Tarin-Terrazas et al., 2022). Enfocar la generación de conocimiento científico en los flujos de carbono de los manglares, tanto verticales como laterales, ayudará a comprender más profundamente el potencial de estos ecosistemas como parte de las soluciones climáticas naturales (Macreadie et al., 2019), en vez de hacerlo solo a través del estudio de la magnitud de los reservorios dentro de los manglares (como el suelo y la biomasa) y sus tasas de acumulación.

## RECONOCIMIENTOS

La primera autora agradece al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías [Conahcyt] por la beca doctoral recibida durante la elaboración del presente manuscrito. Se extiende el agradecimiento a Lorrain E. Giddins Soto por la elaboración del mapa presentado en la figura 5.

## REFERENCIAS

- Adame, M. F., Santini N. S., Torres-Talamante, O., & Rogers K. (2021). Mangrove sinkholes (cenotes) of the Yucatan Peninsula, a global hotspot of carbon sequestration. *Biology Letters*, 17, 20210037. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2021.0037>
- Adame, M. F. (2021). Meaningful collaborations can end ‘helicopter research’. *Nature*, 10,. <https://doi.org/10.1038/d41586-021-01795-1>
- Adams, J. (2010). Plants and the carbon cycle. En J. Adams (Ed.), *Vegetation-Climate Interaction* (pp. 181-217). Springer Praxis Books. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-00881-8\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-642-00881-8_7)
- Allen, D. E., Dalal, R. C., Rennenberg, H., Meyer, R. L., Reeves, S., & Schmidt, S. (2007). Spatial and temporal variation of nitrous oxide and methane flux between subtropical mangrove sediments and the atmosphere. *Soil Biology and Biochemistry*, 39(2), 622-631. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2006.09.013>
- Alongi, D. M. (2014). Carbon cycling and storage in mangrove forests. *Annual review of marine science*, 6, 195-219. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-010213-135020>
- Alvarado-Barrientos, M. S., López-Adame, H., Lazcano-Hernández, H. E., Arellano-Verdejo, J., & Hernández-Arana, H. A. (2021). Ecosystem-atmosphere Exchange of CO<sub>2</sub>, Water, and Energy in a Basin Mangrove of the Northeastern Coast of the Yucatan Peninsula. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 126, e2020JG005811. <https://doi.org/10.1029/2020JG005811>
- Barr, J. G., Engel, V., Fuentes, J. D., Zieman, J. C., O'Halloran, T. L., Smith, T. J., & Anderson, G. H. (2010). Controls on mangrove forest-atmosphere carbon dioxide exchanges in western Everglades National Park. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 115, G02020. <https://doi.org/10.1029/2009jg001186>
- Barnes, J., Ramesh, R., Purvaja, R., Nirmal Rajkumar, A., Senthil Kumar, B., Krithika, K., Ravichandran, G., Uher, R., & Upstill-Goddard, R. (2006). Tidal dynamics and rain-fall control N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> emissions from a pristine mangrove creek. *Geophysical Research Letters*, 33(15), L15405. <https://doi.org/10.1029/2006GL026829>
- Bouillon, S., Borges, A. V., Castañeda-Moya, E., Diele, K., Dittmar, T., Duke, N. C., Kristensen, E., Lee, S. Y., Marchand, C., Middelburg, J. J., Rivera-Monroy, V. H., Smith II, T. J., & Twilley, R. R. (2008). Mangrove production and carbon sinks: A revision of global budget estimates. *Global Biogeochemical Cycles*, 22(2), 1-12. <https://doi.org/10.1029/2007GB003052>
- Cadena, S., & Ochoa-Gómez, J. (2023) Mangroves: “super-hero” ecosystems. *Biodiversity*, 10, 812948. <http://doi.org/10.3389/frym.2022.812948>
- Calderón-Aguilera, L. E., Rivera-Monroy, V. H., Porter-Bolland, L., Martínez-Yrizar, A., Ladah, L. B., Martínez-Ramos, M., Alcocer, J., Santiago-Pérez, A. L., Hernandez-Arana, H. A., Reyes-Gómez, V. M., Pérez-Salicrup, D. R., Díaz-Núñez, V., Sosa-Ramírez, J., Herrera-Silveira, J., & Búrquez, A. (2012). An assessment of natural and human disturbance effects on Mexican ecosystems: current trends and research gaps. *Biodiversity and Conservation*, 21, 589-617. <https://doi.org/10.1007/s10531-011-0218-6>
- Castillo, J. A. A., Apan, A. A., Maraseni, T. N., & Salmo III, S. G. (2017). Soil greenhouse gas fluxes in tropical mangrove forests and in land uses on deforested mangrove lands. *Catena*, 159, 60-69. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.08.005>
- Chauhan, R., Datta, A., Ramanathan, A. L., & Adhya, T. K. (2015). Factors influencing spatio-temporal variation of methane and nitrous oxide emission from a tropical mangrove of eastern coast of India. *Atmospheric Environment*, 107, 95-106. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.02.006>



- Chauhan, R., Datta, A., Ramanathan, A. L., & Adhya, T. K. (2017). Whether conversion of mangrove forest to rice cropland is environmentally and economically viable? *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 246, 38-47. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.05.010>
- Chen, G. C., Tam, N. F. Y., Wong, Y. S., & Ye, Y. (2011). Effect of wastewater discharge on greenhouse gas fluxes from mangrove soils. *Atmospheric Environment*, 45(5), 1110-1115. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.11.034>
- Chen, H., Lu, W., Yan, G., Yang, S., & Lin, G. (2014). Typhoons exert significant but differential impacts on net ecosystem carbon exchange of subtropical mangrove forests in China. *Biogeosciences*, 11(19), 5323-5333. <https://doi.org/10.5194/bg-11-5323-2014>
- Chen, G., Bai, J., Bi, C., Wang, Y., & Cui, B. (2023). Global greenhouse gas emissions from aquaculture: a bibliometric analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 348, 108405. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108405>
- Chuang, P. C., Young, M. B., Dale, A. W., Miller, L. G., Herrera-Silveira, J. A., & Paytan, A. (2017). Methane fluxes from tropical coastal lagoons surrounded by mangroves, Yucatán, Mexico. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 122(5), 1156-1174. <https://doi.org/10.1002/2017JG003761>
- Cinco-Castro, S., & Herrera-Silveira, J. (2020). Vulnerability of mangrove ecosystems to climate change effects: The case of the Yucatan Peninsula. *Ocean & Coastal Management*, 192, 105196. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2020.105196>
- Cisneros-de la Cruz, D. J., Herrera-Silveira, J. A., Teutli-Hernández, C., Ramírez-García, S. A., Moreno-Martínez, A., Pérez-Martínez, O., Canul-Cabrera, A., Mendoza-Martínez, J., Montero-Muñoz, J., Paz-Pellat, F., & Roman-Cuesta, R. M. (2021) *Manual para la medición, monitoreo y reporte del carbono y gases de efecto invernadero en manglares en restauración*. Cifor - Cinvestav-IPN - UNAM-Sisal - PMC. [https://www.cifor-icraf.org/publications/pdf\\_files/Reports/Manual-SWAMP-sp.pdf](https://www.cifor-icraf.org/publications/pdf_files/Reports/Manual-SWAMP-sp.pdf)
- Cui, X., Liang, J., Lu, W., Chen, H., Liu, F., Lin, G., Xu, F., Luo, J., & Lin, G. (2018). Stronger ecosystem carbon sequestration potential of mangrove wetlands with respect to terrestrial forests in subtropical China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 249, 71-80. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.11.019>
- Cummings, A. R., & Shah, M. (2017). Mangroves in the global climate and environmental mix. *Geography Compass*, 12, 1-17. <https://doi.org/10.1111/gec3.12353>
- Dados, N. & Connell, R. (2012). The Global South. *Contexts*, 11(1), 12-13. <https://doi.org/10.1177/1536504212436479>
- Donato, D. C., Kauffman, J. B., Murdiyarso, D., Kurnianto, S., Stidham, M., & Kanninen, M. (2011). Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics. *Nature Geoscience*, 4(5), 293-297. <https://doi.org/10.1038/ngeo1123>
- Duarte, C. M., Losada, I. J., Hendriks, I. E., Mazarrasa, I., & Marbà, N. (2013). The role of coastal plant communities for climate change mitigation and adaptation. *Nature Climate Change*, 3, 961-968. <https://doi.org/10.1038/nclimate1970>
- Duarte-de Paula Costa, M., & Macreadie, P. I. (2022). The Evolution of Blue Carbon Science. *Wetlands*, 42(8), 109. <https://doi.org/10.1007/s13157-022-01628-5>
- Dutta, M. K., Chowdhury, C., Jana, T. K., & Mukhopadhyay, S. K. (2013). Dynamics and exchange fluxes of methane in the estuarine mangrove environment of the Sundarbans, NE coast of India. *Atmospheric Environment*, 77, 631-639. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.05.050>
- Drubin, D. G., & Kellogg, D. R. (2012). English as the universal language of science: opportunities and challenges. *Molecular Biology of the Cell*, 23(8), 1399. <https://doi.org/10.1091/mbc.e12-02-0108>
- Elsner, J. B., Kossin, J. P., & Jagger, T. H. (2008). The increasing intensity of the strongest tropical cyclones. *Nature*, 455(7209), 92-95. <https://doi.org/10.1038/nature07234>
- Fang, J., Tang, Y., & Son, Y. (2010). Why are East Asian ecosystems important for carbon cycle research? *Science China. Life Sciences*, 53(7), 753-756. <https://doi.org/10.1007/s11427-010-4032-2>
- Gao, G. F., Zhang, X. M., Li, P. F., Simon, M., Shen, Z. J., Chen, J., Gao, C. H., & Zheng, H. L. (2020). Examining soil carbon gas (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>) emissions and the effect on functional microbial abundances in the Zhangjiang Estu-



- ary Mangrove Reserve. *Journal of Coastal Research*, 36(1), 54-62. <https://doi.org/10.2112/JCOAS-TRES-D-18-00107.1>
- Gao, C. H., Zhang, S., Ding, Q. S., Wei, M. Y., Li, H., Li, J., Wen, C., Gao, G. F., Liu, Y., Zhou, J. J., Zhang, J. Y., You, Y. P., & Zheng, H. L. (2021). Source or sink? A study on the methane flux from mangroves stems in Zhangjiang estuary, southeast coast of China. *Science of The Total Environment*, 788, 147782. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147782>
- Giri, C., Ochieng, E., Tieszen, L. L., Zhu, Z., Singh, A., Loveland, T., Masek, J., & Duke, N. (2011). Status and distribution of mangrove forests of the world using earth observation satellite data. *Global Ecology and Biogeography*, 20(1), 154-159. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00584.x>
- Gnanamoorthy, P., Selvam, V., Burman, P. K. D., Chakraborty, S., Karipot, A., Nagarajan, R., Ramasubramanian, R., Song, Q., Zhang, Y., & Grace, J. (2020). Seasonal variations of net ecosystem (CO<sub>2</sub>) exchange in the Indian tropical mangrove forest of Pichavaram. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 243, 106828. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2020.106828>
- Granados-Martínez, K. P., Yépez, E. A., Sánchez-Mejía, Z. M., Gutiérrez-Jurado, H. A., & Méndez-Barroso, L. A. (2021). Environmental controls on the temporal evolution of energy and CO<sub>2</sub> fluxes on an arid mangrove of Northwestern Mexico. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 126(7), e2020JG005932. <https://doi.org/10.1029/2020JG005932>
- Hernández, M. E. (2010). Suelos de humedales como sumideros de carbono y fuentes de metano. *Terra Latinoamericana*, 28(2), 139-147.
- Hernández, M. E., & Junca-Gómez, D. (2020). Carbon stocks and greenhouse gas emissions (CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O) in mangroves with different vegetation assemblages in the central coastal plain of Veracruz Mexico. *Science of The Total Environment*, 741, 1-36. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140276>
- Herrera-Silveira, J. A., & Teutli-Hernández, C. (2017). Carbono azul, manglares y política pública. *Elementos para Políticas Públicas*, 1(1), 43-52.
- Ho, Y. S., & Mukul, S. A. (2021). Publication performance and trends in mangrove forests: A bibliometric analysis. *Sustainability*, 13(22), 12532. <https://doi.org/10.3390/su132212532>
- Hook, D., Porter, S., & Herzog, C. (2018). Dimensions: Building Context for Search and Evaluation. *Frontiers in Research Metrics Analytics*, 3, 23. <https://doi.org/10.3389/frma.2018.00023>
- Huxham, M., Dencer-Brown, A., Diele, K., Kathiresan, K., Nagelkerken, I., & Wanjiru, C. (2017). Mangroves and people: local ecosystem services in a changing climate. En V. Rivera-Monroy, S. Lee, E. Kristensen, & R. Twilley (Eds), *Mangrove Ecosystems: A Global Biogeographic Perspective. Structure, Function, and Services*, (pp. 245-274). [https://doi.org/10.1007/978-3-319-62206-4\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-319-62206-4_8)
- Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC] (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Jennerjahn, T. C. (2020). Relevance and magnitude of 'Blue Carbon' storage in mangrove sediments: Carbon accumulation rates vs. stocks, sources vs. sinks. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 247, 107027. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2020.107027>
- Jiang, L., Yang, T., & Yu, J. (2022). Global trends and prospects of blue carbon sinks: a bibliometric analysis. *Environmental Science Pollution Research*, 29(44), 65924-65939. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22216-4>
- Keenan, T. F., & Williams, C. A. (2018). The terrestrial carbon sink. *Annual Review of Environment and Resources*, 43(1), 219-243. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102017-030204>
- Kristensen, E., Bouillon, S., Dittmar, T., & Marchand, C. (2008). Organic carbon dynamics in mangrove ecosystems: A review. *Aquatic Botany*, 89(2), 201-219. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2007.12.005>
- Kristensen, E., Valdemarsen, T., Moraes, P. C., Güth, A. Z., Sumida, P. Y., & Quintana, C. O. (2022). Pneumatophores and crab burrows increase CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> emission



- from sediments in two Brazilian fringe mangrove forests. *Marine Ecology Progress Series*, 698, 29-39. <https://doi.org/10.3354/meps14153>
- Krithika, K., Purvaja, R., & Ramesh, R. (2008). Fluxes of methane and nitrous oxide from an Indian mangrove. *Current Science*, 94(2), 218-224. <http://www.jstor.org/stable/24101861>
- Leopold, A., Marchand, C., Renchon, A., Deborde, J., Quiniou, T., & Allenbach, M. (2016). Net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange in the "Coeur de Voh" mangrove, New Caledonia: Effects of water stress on mangrove productivity in a semi-arid climate. *Agricultural and Forest Meteorology*, 223, 217-232. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.04.006>
- Li, M. S., & Lee, S. Y. (1997). Mangroves of China: a brief review. *Forests Ecology and Management*, 96(3), 241-259. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(97\)00054-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(97)00054-6)
- Litmaps Ltd. (2023). *Litmaps*. <https://www.litmaps.com/>
- Liu, J., & Lai, D. Y. F. (2019). Subtropical mangrove wetland is a stronger carbon dioxide sink in the dry than wet seasons. *Agricultural and Forest Meteorology*, 278, 107644. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107644>
- Lu, W., Xiao, J., Liu, F., Zhang, Y., Liu, C., & Lin, G. (2017). Contrasting ecosystem CO<sub>2</sub> fluxes of inland and coastal wetlands: A meta-analysis of eddy covariance data. *Global Change Biology*, 23(3), 1180-1198. <https://doi.org/10.1111/gcb.13424>
- Ma, W., Li, H., Zhang, W., Shen, C., Wang, L., Li, Y., Li, Q., & Wang, Y. (2020). TiO<sub>2</sub> nanoparticles accelerate methanogenesis in mangrove wetlands sediment. *Science of the Total Environment*, 713, 136602. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136602>
- Macreadie, P. I., Anton, A., Raven, J. A., Beaumont, N., Connolly, R. M., Friess, D. A., Kelleway, J. J., Kennedy, H., Kuwae, T., Lavery, P., Lovelock, C. E., Smale, D. A., Apostolaki, E. T., Atwood, T. B., Baldock, J., Bianchi, T. S., Chmura, G. L., Eyre, B. D., Fourqurean, J. W., & Duarte, C. M. (2019). The future of Blue Carbon science. *Nature communications*, 10(1), 3998. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-11693-w>
- Macreadie, P. I., Costa, M. D. P., Atwood, T. B., Friess, D. A., Kelleway, J. J., Kennedy, H., Lovelock, C. E., Serrano, O., & Duarte, C. M. (2021). Blue carbon as a natural climate solution. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2(12), 826-839. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00224-1>
- McLeod, E., Chmura, G. L., Bouillon, S., Salm, R., Björk, M., Duarte, C. M., Lovelock, C. E., Schlesinger, W. H., & Silliman, B. R. (2011). A blueprint for blue carbon: toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO<sub>2</sub>. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9(10), 552-560. <https://doi.org/10.1890/110004>
- Menéndez, P., Losada, I. J., Torres-Ortega, S., Narayan, S., & Beck, M. W. (2020). The global flood protection benefits of mangroves. *Scientific Reports*, 10(1), 1-11. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61136-6>
- Michán, L., & Muñoz-Velasco, I. (2013). Cienciometría para ciencias médicas: definiciones, aplicaciones y perspectivas. *Investigación en educación médica*, 2(6), 100-106. [http://doi.org/10.1016/S2007-5057\(13\)72694-2](http://doi.org/10.1016/S2007-5057(13)72694-2)
- Millán, J. D., Polanco, F., Ossa, J. C., Béria, J., & Cudina, J. N. (2017). La cienciometría, su método y su filosofía: Reflexiones epistémicas de sus alcances en el siglo XXI. *Revista Guillermo de Ockham*, 15(2), 17-27. <https://doi.org/10.21500/22563202.3492>
- Moreno-Casasola, P. (2016). *Servicios ecosistémicos de las selvas y bosques costeros de Veracruz*. INECOL - ITTO - CONAFOR - INECC.
- Nellemann, C., Corcoran, E., Duarte, C. M., Valdés, L., De Young, C., Fonseca, L., & Grimsditch, G. (2009). *Blue carbon: the role of healthy oceans in binding carbon. A rapid Response Assessment*. GRID-Arendal.
- Pendleton, L., Donato, D. C., Murray, B. C., Crooks, S., Jenkins, W. A., Siffleet, S., Craft, C., Fourqurean, J. W., Kauffman, J. W., Marbà, N., Megonigal, P., Pidgeon, E., Herr, D., Gordon, D., & Baldera, A. (2012) Estimating Global "Blue Carbon" Emissions from Conversion and Degradation of Vegetated Coastal Ecosystems. *PLOS ONE*, 7(9), e43542. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0043542>
- Quevedo, J. M. D., Uchiyama, Y., & Kohsaka, R. (2023). Progress of blue carbon research: 12 years of global trends based on content analysis of peer-reviewed and 'gray literature'

- documents. *Ocean & Coastal Management*, 236, 106495. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2023.106495>
- Rivera-Monroy, V. H., Castañeda-Moya, E., Barr, J. G., Engel, V., Fuentes, J. D., Troxler, T. G., Twilley, R. R., Bouillon, S., Smith III, T. J., & O'Halloran, T. L. (2013). Current methods to evaluate net primary production and carbon budgets in mangrove forests. En R. D. DeLaune, K. R. Reddy, C. J. Richardson, & J. P. Megonigal (Eds.), *Methods in Biogeochemistry of Wetlands* (pp. 243-288). American Society of Agronomy.
- Rodda, S. R., Thumaty, K. C., Fararoda, R., Jha, C. S., & Dadhwal, V. K. (2022). Unique characteristics of ecosystem CO<sub>2</sub> exchange in Sundarban mangrove forest and their relationship with environmental factors. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 267, 107764. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2022.107764>
- Rosentreter, J. A., Maher, D. T., Erler, D. V., Murray, R. H., & Eyre, B. D. (2018). Methane emissions partially offset "blue carbon" burial in mangroves. *Science Advances*, 4(6), eaao4985. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aao4985>
- Rosentreter, J. A., Laruelle, G. G., Bange, H. W., Bianchi, T. S., Busecke, J. J., Cai, W. J., Eyre, B. D., Forbrich, I., Kwon, E. Y., Maavara, T., Moosdorf, N., Najjar, R. G., Sarma, V. V. S. S., Dam, B. V., & Regnier, P. (2023). Coastal vegetation and estuaries are collectively a greenhouse gas sink. *Nature Climate Change*, 13(6), 579-587. <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01682-9>
- Sheng, N., Wu, F., Liao, B., & Xin, K. (2021). Methane and carbon dioxide emissions from cultivated and native mangrove species in Dongzhai Harbor, Hainan. *Ecological Engineering*, 168, 106285. <https://doi.org/10.1016/j.ecoeng.2021.106285>
- Schlesinger, W. H., & Bernhardt, E. S. (2013). *Biogeochemistry: An analysis of Global Change* (3a ed.). Academic Press.
- Tarin-Terrazas, T., Alvarado-Barrientos, M. S., Cueva-Rodríguez, A., Hinojo-Hinojo, C., González del Castillo, E., Sánchez-Mejía, Z., Villareal-Rodríguez, S., & Yépez-González, E. A. (2022). MexFlux: sinergias para diseñar, evaluar, e informar soluciones climáticas naturales. *Elementos para Políticas Públicas*, 4(2), 99-116. <https://www.elementospolipub.org/ojs/index.php/epp/article/view/37>
- The World Bank Group (2024). World Bank Open Data. <https://data.worldbank.org/>
- Twilley, R. R., Chen, R. H., & Hargis, T. (1992). Carbon sinks in mangroves and their implications to carbon budget of tropical coastal ecosystems. *Water, Air, and Soil Pollution*, 64, 265-288. <https://doi.org/10.1007/BF00477106>
- Uuh-Sonda, J., Sánchez-Mejía, Z., & Figueroa Espinoza, B. (2023). Análisis de flujos ecohidrológicos ecosistema-atmósfera en un manglar de la Península de Yucatán. En A. Aguilar, E. Yépez, J. García, J. Torres, J. Arreola, R. Baraza, & Z. Sánchez (Comp.). *Memorias arbitradas, VI Congreso Mexicano de Ecosistemas de Manglar*, (p. 56.). Comité Mexicano de Manglares. [https://www.biodiversidad.gob.mx/media/1/ecosistemas/smmanglares/files/MEMORIAS\\_VI\\_CONGRESO\\_MANGLARES\\_2023.pdf](https://www.biodiversidad.gob.mx/media/1/ecosistemas/smmanglares/files/MEMORIAS_VI_CONGRESO_MANGLARES_2023.pdf)
- Vargas-Terminel, M. L., Rodríguez, J. C., Yépez, E. A., Robles-Zazueta, C. A., Watts, C., Garatuza-Payán, J., Vargas, R., & Sanchez-Mejia, Z. M. (2023). Ecosystem-atmosphere CO<sub>2</sub> exchange from semiarid mangroves in the Gulf of California. *Journal of Arid Environments*, 208, 104872. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2022.104872>
- Wang, W., Fu, H., Lee, S. Y., Fan, H., & Wang, M. (2020). Can strict protection stop the decline of mangrove ecosystems in China? From rapid destruction to rampant degradation. *Forests*, 11(1), 55. <https://doi.org/10.3390/f11010055>
- Wedding, L. M., Moritsch, M., Verutes, G., Arkema, K., Hartge, E., Reiblich, J., Douglass, J., Taylor, S., & Strong, A. L. (2021). Incorporating blue carbon sequestration benefits into sub-national climate policies. *Global Environmental Change*, 69, 102206. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2020.102206>
- Xu, S., Sheng, C., & Tian, C. (2020). Changing soil carbon: influencing factors, sequestration strategy and research direction. *Carbon balance and Management*, 15(1), 1-9. <https://doi.org/10.1186/s13021-020-0137-5>
- Yang, W. B., Yuan, C. S., Huang, B. Q., Tong, C., & Yang, L. (2018). Emission characteristics of greenhouse gases and their correlation with water quality at an estuarine man-



- grove ecosystem—the application of an in-situ on-site NDIR monitoring technique. *Wetlands*, 38(4), 723-738. <https://doi.org/10.1007/s13157-018-1015-8>
- Yin, S., Wang, J., & Zeng, H. (2023). A bibliometric study on carbon cycling in vegetated blue carbon ecosystems. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(3), 74691–74708. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27816-2>
- Yoro, K. O., & Daramola, M. O. (2020). CO<sub>2</sub> emission sources, greenhouse gases, and the global warming effect. En M. R. Rahimpour, M. Farsi, & M. A. Makarem (Eds.), *Advances in carbon capture* (pp. 3-28). Woodhead Publishing.
- Yu, X., Yang, X., Wu, Y., Peng, Y., Yang, T., Xiao, F., Zhong, Q., Xu, K., Shu, L., He, Q., Tian, Y., Yan, Q., Wang, C., Wu, B., & He, Z. (2020). *Sonneratia apetala* introduction alters methane cycling microbial communities and increases methane emissions in mangrove ecosystems. *Soil Biology and Biochemistry*, 144, 107775. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107775>
- Zhao, X., Wang, C., Li, T., Zhang, C., Fan, X., Zhang, Q., Zhang, Q., Chen, X., Zou, X., Shen, C., Tang, Y., & Qin, Z. (2022). Net CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> emissions from restored mangrove wetland: New insights based on a case study in estuary of the Pearl River, China. *Science of The Total Environment*, 811, 151619. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151619>
- Zhi, W., Yuan, L., Ji, G. Liu, Y., Cai, Z., & Chen, X. (2015). A bibliometric review on carbon cycling research during 1993-2013. *Environmental Earth Sciences*, 74(7), 6065-6075. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4629-7>
- Zhu, X., Sun, C., & Qin, Z. (2021). Drought-induced salinity enhancement weakens mangrove greenhouse gas cycling. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 126, e2021JG006416. <https://doi.org/10.1029/2021JG006416>
- Zygomatic (2024). *WorldClouds*. <https://www.wordclouds.com>
- Manuscrito recibido el 16 de agosto de 2023
- Aceptado el 29 de diciembre de 2023
- Publicado el 28 de junio de 2024
- Este documento se debe citar como:
- Vázquez-Benavides, J., Alvarado-Barrientos, M. S., & Pineda-López M. R. (2024). Revisión cuantitativa (1990-2022) del ciclo del carbono y los flujos de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> de manglares. *Madera y Bosques*, 30(4), e3042628. <https://doi.org/10.21829/myb2024.3042628>



*Madera y Bosques*, por Instituto de Ecología, A.C. se distribuye bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual 4.0 Internacional.