

# CARBONO EN ECOSISTEMAS ACUÁTICOS EPICONTINENTALES: UNA VISIÓN PARA EL DESARROLLO DE POLÍTICAS PÚBLICAS

## CARBON IN EPICONTINENTAL AQUATIC ECOSYSTEMS: A VISION FOR THE DEVELOPMENT OF PUBLIC POLICIES

Javier Alcocer<sup>1†</sup>, Mariana Vargas<sup>2</sup>, Enrique Kato<sup>3</sup> y Luis A. Oseguera<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Grupo de Investigación en Limnología Tropical, FES Iztacala, Universidad Nacional Autónoma de México, Av. De los Barrios 1, Los Reyes Iztacala, CP 54090, Tlalnepantla, Estado de México

<sup>2</sup>Programa de Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México, Av. Universidad 3000, Delegación Coyoacán, CP 04510, Ciudad de México, México

<sup>3</sup>CIATEC. Medio Ambiente y Biotecnología. Omega 201. Col. Industrial Delta, C.P. 37545, León, Guanajuato, México.

†Autor de correspondencia: jalcocer@unam.mx

### RESUMEN

Hasta hace poco más de diez años, el papel de los cuerpos acuáticos epicontinentales en el ciclo global del carbono (C) era considerado poco importante. Sin embargo, se ha demostrado que éstos desempeñan un papel significativo en el ciclo global del C y por ende en el fenómeno de cambio climático. Los cuerpos acuáticos epicontinentales mexicanos proveen importantes servicios de regulación, tales como la modulación del clima, el ciclo hidrológico y el secuestro de C. Estos sistemas pueden funcionar como factores de secuestro o sumideros de C al incorporar dióxido de C (CO<sub>2</sub>) atmosférico, pero, asimismo, pueden funcionar como fuentes o emisores de CO<sub>2</sub> y otros gases activos en el efecto de invernadero. Las estimaciones de los flujos de C en sistemas acuáticos epicontinentales son vitales para comprender el ciclo global del C y con ello realizar proyecciones a futuro de los posibles cambios climáticos que la humanidad enfrentará. Para alcanzar la precisión necesaria para sustentar la toma de decisiones y la intercomparabilidad de resultados en los cuerpos de agua estudiados por distintos grupos de investigación, es indispensable la estandarización de métodos. El uso y principalmente el mal uso de los cuerpos acuáticos epicontinentales ha conducido a su deterioro, en su mayoría por las crecientes actividades humanas, lo cual evidencia la impetuosa necesidad de manejarlos correctamente con el fin de poder garantizar su uso sostenible. El aprovechamiento sostenible de estos valiosos recursos acuáticos garantizaría seguir obteniendo la gran variedad de bienes y servicios que proporcionan en generaciones futuras. El objetivo anterior, la conservación de los cuerpos acuáticos epicontinentales debe ser entendido como una prioridad nacional y reconocer que éstos constituyen el recurso acuático necesario para el uso doméstico, agrícola, pecuario e industrial del país, por lo que se presenta una visión del estado actual del conocimiento que se tiene sobre su papel en el ciclo del C en México, los vacíos y omisiones en el conocimiento, ante la urgencia de diseñar políticas precisas y orientadas a establecer las prioridades para su conservación y restauración con el fin de garantizar el desarrollo sostenible del país.

**Palabras Clave:** ciclo del carbono; secuestro de carbono; cambio global; GEI; servicios ambientales.

### ABSTRACT

Until just over ten years ago, the role of epicontinental aquatic bodies in the global cycle of carbon (C) was considered unimportant. However, it has been shown that they play a significant role in the global C cycle, and therefore, in climate change. The Mexican epicontinental water bodies provide important regulatory services, such as C sequestration, and climate and hydrological cycle modulation. These aquatic systems can function as C

sequestration factors or sinks by incorporating atmospheric C dioxide (CO<sub>2</sub>), but they can also function as sources or emitters of CO<sub>2</sub> and other active greenhouse gases. Estimates of C fluxes in epicontinental aquatic systems are vital to understanding the global C cycle and thus making future projections of the possible climate changes that humanity could face. Methodological standardization is essential to achieve the precision necessary to support decision-making, and the intercomparison of the water bodies studied by different research groups. The use, and mostly misuse, of epicontinental aquatic bodies has led to their deterioration, which shows the impetuous need to handle them correctly to guarantee their sustainability. The sustainable use of these valuable aquatic resources would guarantee the future use of the great variety of environmental goods and services they provide. The conservation of epicontinental aquatic bodies should be understood as a national priority. Likewise, it is compulsory recognizing these water bodies constitute the essential aquatic resources for domestic, agricultural, livestock and industrial use in the country. Therefore, this paper presents a vision of the current status of knowledge of the epicontinental aquatic ecosystems on the C cycle in Mexico, their gaps and omissions, given the urgency of designing precise policies aimed to establish conservation and restoration priorities to guarantee the sustainable development of the country.

**Index words:** carbon cycle; carbon sequestration; global change; GHG; environmental services.

## INTRODUCCIÓN

La concentración de gases de efecto invernadero (GEI), principalmente dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y metano (CH<sub>4</sub>), ha aumentado en la atmósfera rápidamente desde el comienzo de la revolución industrial. Dicho aumento ha sido generado por diversas actividades antrópicas como la utilización de combustibles fósiles, la deforestación y los cambios en el uso de suelo, entre muchas otras. Ello ha derivado en planes y acciones tendientes a, en esencia, mitigar las emisiones y/o adaptarse a los cambios climáticos que puedan generar.

Hasta hace poco más de una década, los ecosistemas acuáticos epicontinentales no eran considerados como elementos relevantes en el ciclo global del carbono (C) (Cramer *et al.*, 2001); se pensaba que éstos eran tan sólo medios “inertes” de transporte entre los sistemas terrestre (cuena de drenaje) y oceánico (Aufdenkampe *et al.*, 2011). Sin embargo, Cole *et al.* (2007) mostraron que estos sistemas reciben anualmente, a partir de la suma de los aportes naturales y de las fuentes antropogénicas, aproximadamente 1.9 Pg C año<sup>-1</sup> de los cuales ~ 0.2 Pg C año<sup>-1</sup> se depositan y atrapan en los sedimentos acuáticos, al menos 0.8 Pg C año<sup>-1</sup> regresan a la atmósfera y 0.9 Pg C año<sup>-1</sup> llega a los océanos. Si se compara este balance con los ~ 5.0 Pg C año<sup>-1</sup> que capturan los bosques a nivel global (CIFOR, 2009), es claro que los sistemas acuáticos epicontinentales, a pesar de que ocupan una pequeña fracción de la superficie de

la Tierra, desempeñan un papel importante en el ciclo global del C y en la modulación del cambio climático (Dean y Gorham, 1998; Cole *et al.*, 2007; Battin *et al.*, 2008). Esta información ha llevado a un interés creciente por utilizar los ecosistemas acuáticos epicontinentales como indicadores del cambio climático, dado que los cambios ecológicos y biogeoquímicos acaecidos en ellos pueden reflejar patrones en escalas mayores (Williamson *et al.*, 2008).

En todos los trabajos realizados con anterioridad se ha enfatizado la gran incertidumbre asociada con los cálculos globales de emisiones y captura de C a nivel mundial, la cual deriva de la falta de datos y mediciones confiables (Raymond *et al.*, 2013; Wehrli, 2013; Ward *et al.*, 2017). El conocimiento de las concentraciones y los patrones espacio-temporales del flujo de C es esencial para evaluar el balance mundial, pero aun así no se conocen bien los efectos del cambio climático global ni la intensificación de los efectos antropogénicos sobre las estimaciones del antes mencionado flujo de C (Raymond *et al.*, 2008).

Por lo anterior, el objetivo del presente trabajo es exponer una visión general sobre el papel que juegan los cuerpos acuáticos epicontinentales en el ciclo del C en México, en un lenguaje apropiado para ser comunicada a los tomadores de decisiones y el público en general. Con base en esta visión se plantean los vacíos y omisiones en el conocimiento, así como los requerimientos urgentes para diseñar políticas públicas precisas y orientadas a establecer las prioridades para

su conservación y restauración, con el fin de garantizar el desarrollo sostenible del país.

México posee aguas epicontinentales relativamente limitadas en extensión y volumen, pues constituyen únicamente el 0.1% del total de las reservas del mundo. Aunado a lo anterior, la elevada diversidad climática y fisiográfica en México ha dado por resultado una distribución inestable y heterogénea del recurso acuático epicontinental (CONAGUA, 2018). Nuestro país recibe cada año aproximadamente 1,450 km<sup>3</sup> de agua en forma de precipitación pluvial. Se estima que, de ese volumen cerca del 70% se evapo-transpira y regresa a la atmósfera, el 25% escurre por los ríos y arroyos de una red hidrográfica con aproximadamente 630,000 km de longitud y cuyas cuencas cubren el 65% de la superficie territorial continental del país, y el 5% restante se infiltra y recarga los acuíferos (CONAGUA, 2018). Por esta razón es pertinente recalcar que el volumen de agua almacenado en los ecosistemas lénticos y lóticos del país es relativamente pequeño si se contrasta con el volumen utilizado sólo para el abastecimiento público nacional.

En el territorio nacional, la calidad del agua se monitorea sistemáticamente desde 1973 a través de la Red Nacional de Monitoreo (RNMCA) de la CONAGUA. De ahí se conoce que uno de los principales retos a enfrentar actualmente es la eutrofización de los cuerpos acuáticos. El término proviene del griego *eutrofia*, que significa “bien nutrido” y consiste en el

enriquecimiento del agua con nutrientes, especialmente compuestos de nitrógeno y fósforo, sedimentos y materia orgánica. Lo anterior provoca un crecimiento acelerado de la biomasa algal (llamados florecimientos) y produce una perturbación indeseable en el equilibrio del ecosistema con el consecuente deterioro de su calidad y potenciales de uso (Farley, 2012).

De los cuerpos de agua epicontinentales mexicanos para los que se cuenta con información acerca de la dinámica del C, el 37.7% son hipertróficos y eutróficos, el 19.5% son mesotróficos y finalmente un 23.4% son oligotróficos y ultraoligotróficos, lo cual no necesariamente refleja el balance trófico de los cuerpos acuáticos epicontinentales a nivel nacional (Fig. 1). Actualmente, no existe un inventario nacional del estado trófico de todos los cuerpos acuáticos epicontinentales, por lo que es imposible conocer si estos porcentajes coinciden con los datos publicados en estudios científicos. La mayoría de estos cuerpos acuáticos epicontinentales se localizan en el centro de México, la franja más desarrollada urbana e industrialmente y, por ende, más contaminada, por lo que son eutróficos o hipertróficos (Alcocer, 2019). En el extremo opuesto, los cuerpos acuáticos ultraoligotróficos se ubican en regiones remotas, relativamente alejadas de la influencia humana directa; por ejemplo, dos de ellos están en el cráter del volcán Nevado de Toluca a una altura de más de 4,000 m s.n.m. (Alcocer *et al.*, 2004).

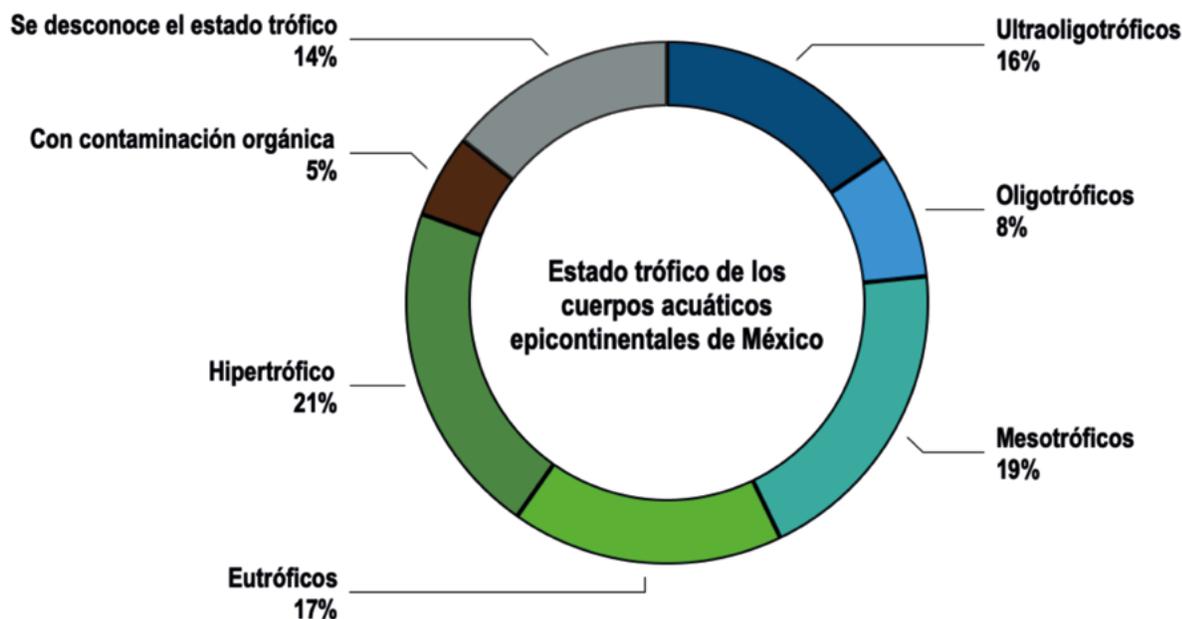


Figura 1. Estado trófico de los cuerpos acuáticos epicontinentales de México con información sobre carbono (Modificada de Alcocer *et al.*, 2019).

En general, México cuenta con muy escasos trabajos relacionados con los flujos de C en sistemas acuáticos epicontinentales (Alcocer *et al.*, 2018; Butman *et al.*, 2018) (Fig. 2). Sin embargo, el reconocimiento de la importancia ecológica, económica y social de estos

ecosistemas, en México y a nivel mundial, ha generado en los últimos años un incremento significativo en la necesidad de evaluar los cambios ocurridos en ellos, ya sea causados de manera natural o por actividades antropogénicas.

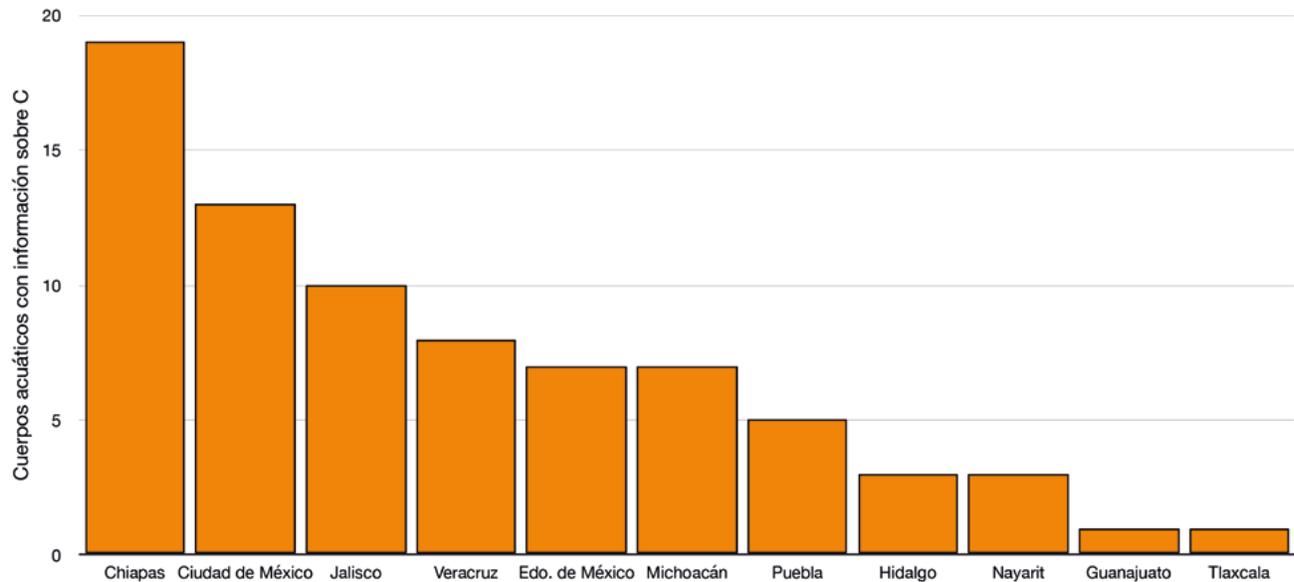


Figura 2. Número de cuerpos acuáticos epicontinentales por estado de la República Mexicana con información sobre carbono (Modificada de Alcocer *et al.*, 2019).

## SERVICIOS AMBIENTALES

Idealmente, la interacción de los ecosistemas acuáticos epicontinentales y la sociedad debería estar fundamentada en diagnósticos realizados por distintos grupos de trabajo científico enfocados en su estudio. Sin embargo, la realidad es que las actividades económicas, a nivel local y regional, siempre han sido privilegiadas y consideradas de mayor importancia, lo cual deriva en acciones que, de acuerdo con los protocolos internacionales y la legislación nacional, no son adecuadas para la conservación de los cuerpos acuáticos.

El uso, problemática y grado de deterioro que han sufrido los cuerpos de agua epicontinentales es muy variado. En años recientes se han definido los *servicios ambientales* como los beneficios que las

sociedades humanas obtienen de la biodiversidad y de los ecosistemas (Alcocer *et al.*, 2016). Las actividades antropogénicas han provocado cambios severos en la dinámica de los sistemas acuáticos epicontinentales, debido a que, además de aportar agua para satisfacer las necesidades fisiológicas humanas, éstos han sido utilizados como transportadores (sistemas lóticos) o receptáculos (sistemas lénticos) de desechos. Y por ello, de acuerdo con la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (MEA, 2005), alrededor del 60% de los servicios ambientales que proveen los cuerpos de agua interiores están degradados o son usados de manera insostenible. Aunque calcular del valor económico de los servicios ambientales es bastante complicado, se han hecho algunas estimaciones descritas a continuación (Fig.3).

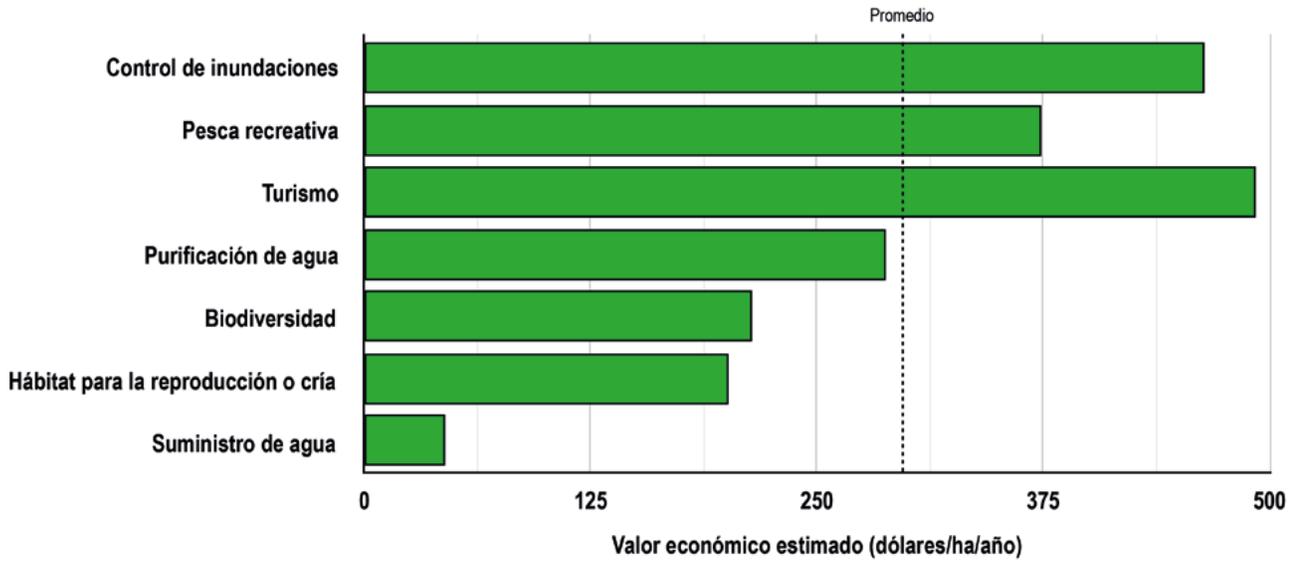


Figura 3. Valoración económica promedio de los servicios ambientales proporcionados por los sistemas acuáticos epicontinentales a nivel global (Schuyt y Brander, 2004).

La producción económica está dividida en bienes físicos y servicios intangibles. Un concepto importante es el relativo a la *función* del ecosistema, la cual se refiere a todos los procesos ecológicos, locales o regionales, llevados a cabo en él mismo. Por otro lado, cuando se describen los *valores* de un ecosistema se hace referencia a lo que tiene relevancia, es deseable o útil para los humanos, desde el punto de vista económico, histórico, educativo, recreativo, estético o espiritual (Cervantes, 2007). Se pueden enlistar los siguientes: 1) servicios de regulación, 2) servicios

de provisión, 3) servicios de soporte y 4) servicios culturales (Cuadro 1).

Los cuerpos de agua interiores proporcionan una gran variedad de bienes y servicios indispensables para la vida diaria y el desarrollo humano. Una de las principales funciones de los ecosistemas acuáticos epicontinentales es el papel que juegan en el ciclo hidrológico. Estos ecosistemas funcionan como almacenes de agua y fuentes de vapor que alcanza la atmósfera, es decir, actúan directa e indirectamente sobre la disponibilidad del recurso hídrico (SEMARNAT, 2008).

Cuadro 1. Principales servicios ambientales proporcionados por sistemas acuáticos epicontinentales (Modificada de SEMARNAT 2015). A: ausente, P: presente, V: valor común e importante.

Servicios ambientales	Ríos y canales	Lagos y reservorios permanentes
<b>Servicios de regulación</b>		
Regulación atmosférica y del clima	A	V
Balance hidrológico	V	V
Control de la contaminación	V	P
Protección contra la erosión	P	A
Protección contra tormentas y vientos	P	V
Secuestro de carbono	V	V

**Cuadro 1. Principales servicios ambientales proporcionados por sistemas acuáticos epicontinentales (Modificada de SEMARNAT 2015). A: ausente, P: presente, V: valor común e importante. (Continuación).**

Servicios ambientales	Ríos y canales	Lagos y reservorios permanentes
<b>Servicios de provisión</b>		
Alimento: pesca comercial y deportiva	V	V
Agua dulce: agua para consumo humano y agrícola.	V	V
<b>Servicios de soporte</b>		
Biodiversidad	V	V
Formación de suelo	V	P
<b>Servicios culturales</b>		
Espiritual e inspiracional	V	V
Recreación: turismo y actividades recreativas	V	V
Valor estético	P	P

Debe resaltarse el importante papel de los sistemas acuáticos epicontinentales mexicanos en los servicios de regulación, que surgen de procesos ecológicos a través de los ciclos biogeoquímicos y otros procesos biológicos, tales como la regulación del clima y del ciclo hidrológico y, en especial, en el secuestro de C. Estos sistemas pueden funcionar como factores de secuestro o sumideros de C al incorporar el CO<sub>2</sub> atmosférico durante la producción de materia orgánica o actuar como fuentes de CO<sub>2</sub> a la atmósfera mediante desequilibrios en la respiración, la producción primaria, la entrada de C en el agua subterránea, en la precipitación de CaCO<sub>3</sub> o en la metanogénesis (producción anaerobia de CH<sub>4</sub>) llevada a cabo en el hipolimnion y en los sedimentos de los cuerpos acuáticos lénticos (Cole *et al.*, 1994; Duarte y Prairie, 2005; Sobek *et al.*, 2005; Bastviken *et al.*, 2011).

En las zonas tropicales, como es el caso de México, los procesos metabólicos que ocurren en los cuerpos acuáticos tienen mayor intensidad e implican mayores tasas de emisiones de GEI en comparación con las zonas templadas (Barros *et al.*, 2011; Raymond *et al.*, 2013; Amado y Roland, 2017). En los trópicos se conjetura que las emisiones de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> aumentan porque las altas temperaturas del agua

incrementan la productividad primaria y los procesos de mineralización de la materia orgánica, responsable del consumo de oxígeno (anoxia) y, finalmente, de la metanogénesis (Sjögersten *et al.*, 2014).

La cuantificación y análisis del C en sus diferentes fracciones ayuda a comprender la importancia de la producción autóctona y del aporte alóctono y permite calcular la eficiencia en el procesamiento de materiales y su transporte entre depósitos (Cole *et al.*, 2007); por tal razón, es importante realizar estimaciones en ambientes acuáticos epicontinentales a nivel mundial (Cole *et al.*, 2007; Tranvik *et al.*, 2018) y elucidar cómo las aguas continentales impactan el ciclo del C (Cuadro 2).

La información disponible acerca de estimaciones de almacenes y flujos de C de cuerpos acuáticos epicontinentales en México, a la fecha, es muy reducido considerando la extensión del país y su heterogeneidad climática y topográfica (Alcocer *et al.*, 2018; Butman *et al.*, 2018). Por lo anterior, las estimaciones de los almacenes y flujos de C actuales reflejan amplias incertidumbres. Realizar estimaciones precisas de los flujos de C es importante para comprender mejor su ciclo global y con ello ser capaces de realizar proyecciones a futuro de los posibles cambios climáticos que enfrentaremos (DelSontro *et al.*, 2018).

**Cuadro 2.** Concentraciones de C medidas en cuerpos acuáticos epicontinentales de México (Alcocer *et al.*, 2019). (n = número de cuerpos de agua cuantificados, D.E. = desviación estándar, CTP = carbono total particulado, COP = carbono orgánico particulado, COD = carbono orgánico disuelto, CID = carbono inorgánico disuelto, CO = carbono orgánico, CI = carbono inorgánico, COT = carbono orgánico total, CO<sub>2</sub> = dióxido de carbono, CH<sub>4</sub> = metano).

Fracción	n	Promedio	D.E.	Mínimo	Máximo
<b>Almacenes en agua</b>					
CTP (µg L <sup>-1</sup> )	18	1,866	1,654	428	5,719
COP (µg L <sup>-1</sup> )	21	1,741	1,529	315	4,758
COD (mg L <sup>-1</sup> )	5	6.5	3.8	1.9	12.0
CID (µg C g <sup>-1</sup> )	26	96.5	122.1	6.7	426.8
<b>Almacenes en sedimento superficial</b>					
CO (%)	19	9.8	5.1	2.1	19.8
CI (%)	1	5.4			
COP (g C m <sup>-2</sup> )	1	26.7	9.6	17.1	36.3
<b>Almacenes en núcleos sedimentarios</b>					
CO (%)	9	2.8	0.6	2.0	3.5
<b>Flujos de carbono</b>					
CTP (mg m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	1	220	61	140	279
<b>Fracción</b>	<b>n</b>	<b>Promedio</b>	<b>D. E.</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
COP (mg m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	1	251			
COT (mg m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	1	343	83	260	427
CO <sub>2</sub> (t CO <sub>2</sub> d <sup>-1</sup> )	3	414	381	112	1,060
CH <sub>4</sub> (t CH <sub>4</sub> d <sup>-1</sup> )	17	6,410	14,295	5	45,400

## CONSERVACIÓN Y RESTAURACIÓN

Anteriormente se definía a la conservación como el estado de armonía entre el hombre y la Tierra (Leopold, 1953). Hoy en día, cuando se habla de conservación, se hace referencia a todas aquellas acciones encaminadas a mantener los ecosistemas en un estado óptimo. Lo anterior se logra mediante la prevención de la degradación del hábitat y la extinción de especies, con el objetivo de fomentar relaciones sustentables entre las comunidades humanas y los ecosistemas (Primack, 1995). Un conocimiento más profundo de la dinámica de los sistemas acuáticos epicontinentales, su diversidad, estado de conservación y posibilidades de restauración debe integrarse

funcionalmente en la sociedad para facilitar la unión de esfuerzos entre los tomadores de decisiones (en todos los niveles de gobierno), la sociedad, los académicos y otras instancias. Es decir, estos ecosistemas requieren figuras de protección multidisciplinarias que incluyan su gestión y conservación (Antón-Pardo *et al.*, 2011).

Los cuerpos acuáticos epicontinentales son ecosistemas que muestran grandes variaciones a lo largo de su vida geológica, lo cual los hace ecosistemas muy dinámicos. Sin embargo y a pesar de dicha condición, son sensibles a ciertos cambios que hoy en día son básicamente originados por actividades antropogénicas: factores como la extracción excesiva de agua, el vertimiento de desechos o la introducción de especies exóticas representan un alto riesgo para

ellos (Cervantes, 2007). Actualmente, tenemos severas repercusiones sociales, problemas de salud pública y afectaciones económicas a nivel nacional como consecuencia de monitoreos deficientes, una regulación y la escasa comunicación entre las autoridades relacionadas con el manejo de los ecosistemas acuáticos epicontinentales (Mazari-Hiriart *et al.*, 2010). Con el objetivo de garantizar un aprovechamiento sostenible de los recursos que proporcionan los cuerpos de agua epicontinentales, así como la conservación de la biodiversidad, existe la necesidad urgente de manejar correctamente dichos sistemas (Lindig-Cisneros y Zambrano, 2007). Esto obliga a incorporar de manera eficiente diversas estrategias entre las cuales se cuentan: 1) el reconocimiento de la importancia de los sistemas acuáticos epicontinentales y los diversos servicios ambientales que proveen y 2) la creación de políticas públicas nacionales claras, precisas efectivas y para establecer prioridades de conservación y restauración.

El crecimiento exponencial de la población humana ha traído consigo un enorme incremento de los desechos generados, y la esquizofrenia y abuso con que se han utilizado arroyos, ríos, lagos y presas como fuentes de agua, suministro de energía eléctrica o como simples drenajes, han causado daños severos que, probablemente, ya no son reversibles. Visto desde otra perspectiva, las condiciones socio-económicas actuales simplemente no permiten la reducción de la presión sobre los ecosistemas, ya que dominan los intereses económicos, más el desinterés general respecto a la irrecuperable riqueza de ecosistemas acuáticos epicontinentales y de formas de vida silvestre. Es muy importante aumentar los esfuerzos para avanzar en el entendimiento de la dinámica general de nuestros ecosistemas acuáticos y en particular de aquellos que son perturbados rápidamente. Los escasos esfuerzos realizados se basan en información puntual y acotada, cuya extrapolación a todo el país es limitada y, por lo tanto, los modelos generados no son precisos (Escobar y Maass, 2008).

## **POLÍTICAS DE MITIGACIÓN Y ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO**

La mitigación del cambio climático puede entenderse como las acciones humanas encaminadas a reducir las fuentes o potenciar los sumideros de GEI (IPCC, 2014). Recientemente nos enfrentamos al reto de desarrollar políticas públicas y mecanismos prácticos que nos permitan adaptarnos y mitigar el cambio

climático global. Por ello, es de vital importancia proporcionar las bases analíticas y cuantitativas que permitan fundamentar e instrumentar dichas políticas y estrategias (Espinosa *et al.*, 2015). Para lograr el antes mencionado reto, es necesario realizar estudios y monitoreos de largo plazo que reflejen el efecto del cambio global sobre los sistemas acuáticos epicontinentales, y con ello analizar las causas precisas del impacto en estos cuerpos acuáticos e identificar los medios para frenarlas.

Los riesgos de los impactos del cambio climático surgen de la interacción entre un peligro (provocado por un fenómeno o tendencia relacionados con el cambio climático), la vulnerabilidad (susceptibilidad a sufrir daños) y la exposición (personas, activos o ecosistemas en riesgo) (IPCC, 2014). Es posible que la emisión continua de GEI causará distorsiones en la temperatura y cambios duraderos en todos los componentes del sistema climático, lo que haría que aumente la probabilidad de impactos graves, generalizados e irreversibles para los ecosistemas.

México forma parte de los 20 países que más GEI emiten en el mundo; sin embargo, sus emisiones nunca han sido superiores al 1.5% del total mundial (ENCC, 2013). En ese sentido, cabe señalar que los criterios nacionales de mitigación se basan en inventarios nacionales de GEI, que desde octubre de 2012 con la promulgación de la Ley General de Cambio Climático se encuentran regulados por ésta, aunque ya se realizaban a nivel nacional y, en algunos casos estatal, desde años anteriores.

Entre los principales impactos que el cambio climático ha tenido sobre las aguas epicontinentales mexicanas y que han podido ser reconocidos a través de estudios científicos se pueden enlistar los siguientes (Alcocer *et al.*, 2015): 1) cambios en el régimen de precipitación y otros componentes meteorológicos y, por lo tanto, cambios en el nivel de agua de ríos, lagos y presas; 2) cambios en la temperatura del agua y, por ende, en la circulación vertical del agua debido a que lo obstaculiza la conformación de capas de agua con distintas temperaturas (alteración en su estratificación) y 3) cambios en las características físico-químicas del agua, en particular para los lagos en el rango latitudinal de México, un aumento en la eutrofización (Martínez-Austria *et al.*, 2010). Para frenar los efectos antes mencionados es necesario reducir de forma sustancial y sostenida las emisiones de GEI, lo cual, junto con la adaptación, podría limitar los riesgos del cambio climático.

## MARCO JURÍDICO-ADMINISTRATIVO

La Ley de Aguas Nacionales (LAN) y su reglamento establecen regulaciones para descargar aguas residuales de origen industrial, de servicios y urbanas en cuerpos de agua nacionales, tanto marinos como epicontinentales, bajo el principio de “*el que contamina paga*”. Se fundamentan en límites máximos permisibles de concentraciones de contaminantes vertidos a cuerpos nacionales o sistemas de drenaje municipal, determinados en las Normas Oficiales Mexicanas de 1996 (NOM-001-SEMARNAT y NOM-002-SEMARNAT), así como en “*condiciones particulares de descarga*” para casos específicos. Además, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) puede exigir a los generadores de las aguas residuales que inviertan en el tratamiento de las mismas antes de su vertido final.

Se suman a las regulaciones anteriores las disposiciones de la Ley General de Cambio Climático (LGCC) de 2012, orientadas a la mitigación de emisiones de GEI y las medidas de adaptación necesarias. En ella se establece que la preservación, restauración, conservación, manejo y aprovechamiento sustentable de los ecosistemas acuáticos, se sujetan a regulación e instrumentación de acciones federales para la mitigación y adaptación al cambio climático (Art. 7°), así como lo es el saneamiento de las aguas para los municipios (Art. 9°).

Para lograr lo anterior, la LGCC determina que la política nacional de cambio climático, con énfasis en las medidas de adaptación, se sustente en instrumentos de diagnóstico, planificación, medición, reporte, verificación y evaluación, con el objetivo de identificar la vulnerabilidad y capacidad de adaptación y transformación de los sistemas ecológicos (Art. 27°) y los programas hídricos de cuencas hidrológicas (Art. 29°). En particular, el Art. 30° señala que los tres órdenes de gobierno deben elaborar los “*diagnósticos de daño en los ecosistemas hídricos*”, sobre los volúmenes de agua y su distribución territorial, al igual que promover el “*aprovechamiento sustentable de fuentes superficiales y subterráneas de agua*”.

En materia de mitigación de emisiones de GEI (Art. 34°) señala también, para los tres órdenes de gobierno, la obligación de diseñar políticas y acciones para proteger, conservar y restaurar la vegetación riparia en el uso y aprovechamiento de las zonas federales de conformidad con la LAN.

A pesar de las disposiciones anteriores, existen vacíos legales y de investigación formal. Un ejemplo es que se desconoce la “*capacidad de carga*” de cada uno de los cuerpos de agua epicontinentales receptores de descargas. Hasta el día de hoy, sólo se cuenta con los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001-89, que establecen las características de calidad del agua deseables para propósitos como la protección de la vida de agua dulce (epicontinental) y marina entre otras, aunque no necesariamente en el contexto de cambio climático.

El vacío mencionado consiste en la carencia de un instrumento metodológico que permita relacionar: a) la calidad de agua regulada en las descargas (asumiendo que sí se cumplieran las NOM-001 y NOM-002), b) la cantidad de descargas autorizadas en un mismo cuerpo de agua y c) el “estado de salud” real del ecosistema. En otras palabras, no hay una herramienta operativa que facilite al personal de la CONAGUA respaldar las autorizaciones que otorga con base en una adecuada estimación de la carga contaminante total que un cuerpo de agua puede recibir sin comprometer su integridad ecosistémica y su aporte a favor de las metas nacionales en función de la adaptación y mitigación del cambio climático.

El desarrollo del instrumento mencionado deberá fundamentarse en trabajo serio de investigación científica como se mencionó antes; de otra manera, no es factible garantizar la salud de los ecosistemas acuáticos —como lo demuestra con contundencia la realidad— y menos aún, entender el impacto de la condición real de éstos respecto a las emisiones de GEI o bien su capacidad de captura de carbono, de acuerdo al espíritu de la LGCC.

La procuración de fondos para la investigación requerida se prevé en la LGCC mediante la creación del Fondo para el Cambio Climático cuyo objetivo es captar y canalizar recursos a las acciones contra el cambio climático, con énfasis en las de adaptación, que permitan recargar mantos acuíferos, conservar la vegetación riparia y aprovechar sustentablemente la biodiversidad (Art. 82°).

Si bien es correcto enfocar los esfuerzos en las medidas de adaptación, la investigación que se apoye debe abrir el abanico de opciones para mejorar la comprensión del papel que juegan los sistemas acuáticos epicontinentales —sujetos a fuertes cargas contaminantes— como fuentes de emisión de GEI o bien del papel que tienen sus características ecosistémicas en el secuestro de carbono y en la reducción de vulnerabilidad a eventos hidrometeorológicos.

Por último, es importante señalar el vacío legal en la LAN respecto a la definición de los cuerpos de agua epicontinentales de competencia local: entre aquellos de carácter nacional y los sistemas artificiales de drenaje, las definiciones señaladas en las legislaciones estatales son ambiguas al grado de que realmente no hay un inventario de tales cuerpos de agua de competencia estatal y, por ende, no están debidamente atendidos.

Obviar la atención a las necesidades y al vacío legal mencionado conduciría a no aprovechar las posibilidades que brindan los cuerpos acuáticos epicontinentales en las tareas de mitigación y adaptación y, más importante aún, a no entender la dimensión que éstos tienen y el papel que juegan en el secuestro neto de C o emisiones GEI que el país realiza y reporta para demostrar el avance hacia las metas comprometidas en el escenario internacional. La investigación científica permitirá evaluar dicho papel, al mismo nivel y profundidad metodológica con los que hoy se hace para los ecosistemas terrestres y sus cambios de uso del suelo.

## CONCLUSIONES

En la literatura científica se han acumulado evidencias a favor de la importancia de los cuerpos de agua epicontinentales en la emisión y secuestro del C atmosférico, en un escenario de cambio climático. A pesar de ello, el conocimiento de las estimaciones de la emisión y secuestro del C atmosférico por los cuerpos de agua epicontinentales en México es incipiente e insuficiente para ponderar su papel en el balance nacional y regional que se estima, entre otros indicadores, a través de los inventarios de GEI.

En términos de representación en el territorio nacional, queda claro que el conocimiento es precario en general, pero prácticamente inexistente en las regiones del norte del país; también, que hay una importante subrepresentación de información para cuerpos de agua lóticos.

Las publicaciones nacionales revelan lo indispensable de adoptar una visión integral que valore holísticamente, a partir de la dinámica del metabolismo del C, el papel de estos cuerpos en el contexto de degradación de la calidad de sus aguas y de su vegetación riparia, de manera que permita atender preguntas específicas tales como ¿de qué manera se alteran los flujos de C bajo condiciones de enriquecimiento trófico o de cargas contaminantes industriales?, ¿qué servicios ambientales de provisión y de regulación de dichos cuerpos no se

aprovechan?, ¿qué medidas de protección, conservación y/o restauración se hacen necesarias para potenciar el papel que juegan a favor de las estrategias nacionales de mitigación y adaptación? y ¿cómo cambia y se adecúa el metabolismo del C ante los cambios estacionales y las distorsiones globales propiciadas por el cambio climático?

Los esfuerzos ordenados de investigación deben partir del establecimiento de metodologías intercomparables y la sistematización de los grupos de investigación del país para cubrir las deficiencias actuales.

El marco legal enfoca apropiadamente la atención a los cuerpos epicontinentales dentro de las estrategias de adaptación al cambio climático y prevé incluso los mecanismos de fondeo para la investigación necesaria; sin embargo, el impacto potencial en aquellas de mitigación, no son tan explícitas.

La ampliación de los objetivos y los mecanismos de fondeo a la investigación, permitirán apoyar la investigación necesaria para contar, por una parte, con los elementos de conocimiento científico que posibiliten corregir, adecuar o incluso crear las políticas públicas respectivas y, por la otra, propiciar la continuidad del monitoreo de las condiciones de esos cuerpos acuáticos, a fin de evaluar la eficacia de las que se adopten.

## REFERENCIAS

- Alcocer, J., L. A. Oseguera, E. Escobar, L. Peralta y A. Lugo. 2004. Phytoplankton biomass and water chemistry in two high-mountain tropical lakes in Central Mexico. *Arctic, Antarctic and Alpine Research* 36:341-345.
- Alcocer, J., G. Vilaclara-Fatjo, O. A. Escolero-Fuentes, L. I. Falcón, P. M. Valdespino y M. Mazari-Hiriart. 2015. Aguas Continentales. En: C. Gay, A. Cos y C. T. Peña (Eds.). *Reporte Mexicano de Cambio Climático; Impactos, vulnerabilidad y adaptación*. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 41-56 pp.
- Alcocer, J., E. Barba-Macías, V. Díaz-Castañeda, M. de L. Jiménez-Badillo, A. L. Lara-Domínguez y J. Sosa-Ramírez. 2016. Cambios en la biodiversidad y sus consecuencias en el funcionamiento de los ecosistemas y sus servicios. En: Balvanera, P., E. Arias-González, R. Rodríguez-Estrella, L. Almeida-Leñero y J. J. Schmitter-Soto (Eds.). *Una mirada al conocimiento de los ecosistemas de México*. Universidad Nacional Autónoma de México, 191-227 pp.
- Alcocer, J., M. Caballero, A. C. Ruiz-Fernández, L. A. Oseguera-Pérez, J. A. Sánchez-Cabeza, J. D. Cuevas-Lara y I. F. Soria-Reinoso. 2018. Base de datos del carbono en cuerpos

- acuáticos epicontinentales de México. Elementos para Políticas Públicas. Programa Mexicano del Carbono 2(1): 1- 18.
- Alcocer, J., M. Caballero, A. C. Ruiz-Fernández, L. A. Osegue-  
ra-Pérez, J. A. Sánchez-Cabeza, J. D. Cuevas-Lara y I.F. So-  
ria-Reinoso. 2019. Ecosistemas Acuáticos Epicontinentales.  
En: Paz-Pellat, F., J. M. Hernández-Ayón, R. Sosa-Ávalos y  
A. S. Velázquez-Rodríguez (Eds.). Estado del Ciclo del Car-  
bono: Agenda Azul y Verde. Programa Mexicano del Carbo-  
no. Texcoco, Estado de México, México. ISBN: EN TRÁMI-  
TE. 716 p.
- Amado, A. y M. Roland. 2017. Microbial role in the carbon cycle  
in tropical inland aquatic ecosystems. *Frontiers in microbiol-  
ogy* 8:20. doi:10.3389/fmicb.2017.00020
- Antón-Pardo, M., C. Olmo, R. Ortells y X. Armengol. 2011. La  
restauración de sistemas acuáticos continentales y su interés  
para la conservación: el ejemplo de las malladas en el Parque  
Natural de l'Albufera (Valencia). *Chronica naturae* 1: 10-19.
- Aufdenkampe, A. K., E. Mayorga, P. A. Raymond, J. M. Melack,  
S. C. Doney, S. R. Alin, R. E. Aalto y K. Yoo. 2011. Rivers  
and the coupling of biogeochemical cycles. *Frontiers in Ecol-  
ogy and the Environment* 9: 53-60 .
- Barros, N., J. J. Cole, L. J. Tranvik, Y. T. Prairie, D. Bastviken,  
V. L. M. Huszar, P. Del Giorgio y F. Roland. 2011. Carbon  
emission from hydroelectric reservoirs linked to reservoir age  
and latitude. *Natural Geoscience* 4: 593-596.
- Bastviken, D., L. J. Tranvik, J. A. Downing, P. M. Crill y A. En-  
rich-Prast. 2011. Freshwater methane emissions offset the  
continental carbon sink. *Science* 331:50. doi: 10.1126/sci-  
ence.1196808
- Battin, T. J., L. A. Kaplan, S. Findlay, C. S. Hopkinson, E. Marti,  
A. I. Packman, J. D. Newbold y F. Sabater. 2008. Biophysical  
controls on organic carbon fluxes in fluvial networks. *Nature  
Geoscience* 1: 95-100.
- Butman, D., R. Striegl, S. Stackpoole, P. del Giorgio, Y. Prairie,  
D. Pilcher, P. Raymond, F. Paz Pellat and J. Alcocer. 2018.  
Chapter 14: Inland waters. In: Cavallaro, N., G. Shrestha, R.  
Birdsey, M. A. Mayes, R. G. Najjar, S. C. Reed, P. Rome-  
ro-Lankao and Z. Zhu (Eds.). *Second State of the Carbon Cy-  
cle Report (SOCCR2): A Sustained Assessment Report*, U.S.  
Global Change Research Program, Washington, DC, USA,  
568-595 pp.
- Centro Internacional de Investigación Forestal. 2009. Senci-  
llamente REDD: Guía sobre bosques, cambio climático y  
REDD. CIFOR. Indonesia.
- Cervantes, M. 2007. Conceptos fundamentales sobre ecosistemas  
acuáticos y su estado en México. En: Sánchez, O., M. Her-  
zig, E. Peters, R. Márquez y L. Zambrano (Eds.). *Perspecti-  
vas sobre conservación de ecosistemas acuáticos en México*.  
Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 293 pp.
- Cole, J. J., N. F. Caraco, G. W. Kling and T. K. Kratz. 1994. Car-  
bon dioxide supersaturation in the surface waters of lakes.  
*Science* 265: 1568-1570.
- Cole, J.J., Y. Prairie, N. Caraco, W. McDowell, L. Tranvik, R.  
Striegl, C.M. Duarte, P. Kortelainen, J.A. Downing, J.J. Mid-  
delburg and J. Melack. 2007. Plumbing the global carbon  
cycle: Integrating inland waters into the terrestrial carbon  
budget. *Ecosystems* 10:172-185. doi.org/10.1007/s10021-  
006-9013-8
- Comisión Nacional del Agua. 2018. Atlas del agua en México,  
CONAGUA, SEMARNAT. México.
- Comisión Nacional del Agua. 2018. Estadísticas del agua en Mé-  
xico, CONAGUA, SEMARNAT. México.
- Comisión Nacional del Agua. (s/a). Normas Oficiales Mexicanas.  
NOM-001-SEMARNAT-1996, NOM-002-SEMARNAT,  
1996, NOM-003-SEMARNAT-1997. SEMARNAT-CONA-  
GUA. Ciudad de México. [http://www.conagua.gob.mx/CO-  
NAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGAA-15-13.pdf](http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGAA-15-13.pdf)  
(Consulta: 18 septiembre, 2019)
- Cramer, W., A. Bondeau, F. Woodward, I. Prentice, R. Betts, V.  
Brovkin, P. Cox, V. Fisher, J. Foley, A. Friend, C. Kuchar-  
ik, M. Lomas, N. Ramankutty, S. Sitch, B. Smith, A. White  
and C. Young-Molling. 2001. Global response of terrestrial  
ecosystem structure and function to CO<sub>2</sub> and climate change:  
results from six dynamic global vegetation models. *Global  
Change Biology* 7: 357-373.
- Dean, W. E. and E. Gorham. 1998. Magnitude and significance  
of carbon burial in lakes, reservoirs, and peatlands. *Geology*  
26: 535-538.
- Del Sontro, T., J. J. Beaulieu and J. A. Downing. 2018. Green-  
house gas emissions from lakes and impoundments: Upscal-  
ing in the face of global change. *Limnology and Oceanogra-  
phy* 3: 64-75.
- Duarte, C. M. and Y. T. Prairie. 2005. Prevalence of heterotrophy  
and atmospheric CO<sub>2</sub> emissions from aquatic ecosystems.  
*Ecosystems* 8: 862-870.
- ENCC. 2013. Estrategia Nacional de Cambio Climático. Visión  
10-20-40. Gobierno de la República.
- Escobar, E. y M. Maass. 2008. Diversidad de procesos funciona-  
les en los ecosistemas. En: *Capital natural de México: Cono-  
cimiento actual de la biodiversidad*. CONABIO, México. 1:  
161-189.
- Espinosa, M., O. A. Peralta-Rosales y T. Castro-Romero. 2015. Ci-  
clos Biogeoquímicos. En: C. Gay, A. Cos y C. T. Peña (Eds.).  
*Reporte Mexicano de Cambio Climático; Bases científicas,  
modelos y modelación*. Universidad Nacional Autónoma de  
México. México. 157-176 pp.
- Farley, M. 2012. Eutrophication in Fresh Waters: An International  
Review. In: Bengtsson, L., R. W. Herschy and R. W. Fair-

- bridge (Eds.). *Encyclopedia of Lakes and Reservoirs*. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, Dordrecht. 954 p.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. 2014. *Cambio climático 2014: Informe de síntesis*. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. R.K. Pachauri y L.A. Meyer, Eds. IPCC, Ginebra, Suiza, 157 pp.
- Leopold, A. 1953. Conservation. In: Leopold, L. B. (Ed.) *Round River: From the Journals of Aldo Leopold*. Oxford University Press, Nueva York. 286 p.
- Lindig-Cisneros, R. y L. Zambrano. 2007. Aplicaciones prácticas para la conservación y restauración de humedales y otros ecosistemas acuáticos. En: Sánchez, O., M. Herzig, E. Peters, R. Márquez y L. Zambrano (Eds.). *Perspectivas sobre conservación de ecosistemas acuáticos en México*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 293 pp.
- Martínez-Austria, P., C. Patiño-Gómez, M. J. Montero-Martínez, J. L. Pérez-López, W. Ojeda-Bustamante, M. D. Mundo-Molina y L. Hernández Barrios. 2010. Efectos del cambio climático en los recursos hídricos. En: Jiménez-Cisneros, B., M. L. Torregrosa y A. L. Aboites-Aguilar (Eds.). *El agua En México: Cauces y Encauces*. Academia Mexicana de Ciencias y Comisión Nacional del Agua. 702 p.
- Mazari-Hiriart, M., A. C. Espinosa, Y. López-Vidal, R. Arredondo-Hernández, E. Díaz-Torres y C. Equihua-Zamora. 2010. Visión integral sobre el agua y la salud. En: Jiménez-Cisneros, B., M. L. Torregrosa y A. L. Aboites-Aguilar (Eds.). *El agua En México: Cauces y Encauces*. Academia Mexicana de Ciencias y Comisión Nacional del Agua. 702 p.
- Millennium Ecosystem Assessment. 2005. *Ecosystems and human well-being: biodiversity synthesis*. World Resources Institute. MEA. Washington, D.C.
- Primack, R. 1995. *A primer of conservation biology*. Sinauer-Sunderland. USA, 277 pp.
- Raymond, P. A., N. Oh, R. Turner and W. Broussard. 2008. Anthropogenically enhanced fluxes of water and carbon from the Mississippi River. *Nature* 451: 449-452 pp.
- Raymond, P. A., J. Hartmann, R. Lauerwald, S. Sobek, C. McDonald, M. Hoover, D. Butman, R. Striegl, E. Mayorga, C. Humborg, P. Kortelainen, H. Dür, M. Meybeck, P. Ciais and Y. P. Guth. 2013. Global carbon dioxide emissions from inland waters. *Nature* 503(7476): 355-359. doi:10.1038/nature12760
- Schuyt, K. and L. Brander. 2004. *Living waters: Conserving the source of life. The economic value of the world's wetlands*. WWF. Switzerland.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2008. *Informe de la situación del medio ambiente en México*. Compendio de estadísticas ambientales. SEMARNAT. México.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2015. *Informe de la situación del medio ambiente en México*. Compendio de estadísticas ambientales, indicadores clave, de desempeño ambiental y de crecimiento verde. SEMARNAT. México
- Sjögersten, S., C. R. Black, S. Evers, J. Hoyos-Santillan, E. L. Wright and B. L. Turner. 2014. Tropical wetlands: A missing link in the global carbon cycle? *Global biogeochemical cycles* 28: 1371-1386.
- Sobek, S., L. J. Tranvik and J. J. Cole. 2005. Temperature independence of carbon dioxide supersaturation in global lakes. *Global Biogeochemical Cycles* 19: 1-10. doi:10.1029/2004GB002264
- Tranvik, L. J., J. J. Cole and Y. T. Prairie. 2018. The study of carbon in inland waters: from isolated ecosystems to players in the global carbon cycle. *Limnology and Oceanography letters* 3:41-48. doi:10.1002/lol2.10068
- Ward, N. D., T. Bianchi, P. Medeiros, M. Seidel, J. Richey, R. Keil and H. Sawakuchi. 2017. Where carbon goes when water flows: carbon cycling across the aquatic continuum. *Frontiers in Marine Science* 4: 1-27.
- Wehrli, B. 2013. Biogeochemistry: conduits of the carbon cycle. *Nature* 503: 346-347.
- Williamson, C., W. Dodds, T. Kratz and M. Palmer. 2008. Lakes and streams as sentinels of environmental change in terrestrial and atmospheric processes. *Frontiers in Ecology and the Environment* 6: 247-254.