

Cálculo de las reservas de carbono en los ecosistemas de marismas y manglares de Pantanos de Centla, México

Los ecosistemas del sureste de México que captan y almacenan carbono azul se encuentran entre los más extensos que se hayan medido en todo el mundo.

Investigadores principales:

Boone Kauffman (presidente y científico principal, Illahee Sciences International, Inc.), **Humberto Hernández Trejo** (Universidad Juárez Autónoma de Tabasco), **María del Carmen Jesús García** (Universidad Juárez Autónoma de Tabasco), **Chris Heider** (Watershed Professionals Network LLC) y **Wilfrido M. Contreras Sánchez** (Universidad Juárez Autónoma de Tabasco)



Manglares estuarinos El Sábalo, en Pantanos de Centla.

Este proyecto de investigación se llevó a cabo con el apoyo de la Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA) en el marco del proyecto *Carbono azul en América del Norte: evaluación del papel de los hábitats costeros en el balance de carbono del subcontinente* (Plan Operativo 2013-2014).

Importantes reservas de carbono en manglares y marismas mexicanos

Los sistemas de manglares de Pantanos de Centla, en el sureste de México, son los humedales más extensos de Mesoamérica y constituyen reservas de carbono excepcionalmente importantes (las mayores de todos los ecosistemas de manglares de la Tierra y entre las mayores de las contenidas en ecosistemas tropicales). Eliminar los manglares para dar otro uso a la tierra o la franja costera conlleva, por lo tanto, un costo sumamente elevado, toda vez que lo más probable sería que el nuevo uso resultante de la conversión no permitiese almacenar tanto carbono o, de hecho, pudiese ocasionar que el carbono almacenado se perdiera mediante emisiones de gases de efecto invernadero. Ello, amén de que se perderían otros importantes servicios ambientales, característicos de los manglares.

Se han llevado a cabo investigaciones con el objeto de evaluar las reservas de carbono en estos ecosistemas y, sobre todo, las diferencias en cuanto a almacenamiento de carbono entre los manglares situados a lo largo de la franja costera y los estuarinos. Como parte de este proyecto también se examinaron las reservas de carbono en tierras de pastoreo creadas en sitios anteriormente ocupados por manglares, y se estimaron las emisiones que podrían emanar de la conversión de manglares a pastizales para ganado. Algunos resultados indican que las reservas de carbono en los sistemas de manglares de Pantanos de Centla son mucho más elevadas que las de los bosques de altura de México, y que su conversión a tierras de pastoreo daría lugar a emisiones considerables.

Este estudio representa la primera cuantificación de las reservas de carbono en los humedales más extensos de Mesoamérica. Es, además, la primera vez que se publican mediciones de reservas de carbono y cálculos de las posibles emisiones resultantes de la conversión de estos manglares a otros usos del suelo.

Resumen del proyecto

Los manglares constituyen ecosistemas sumamente productivos que revisten una enorme importancia en términos tanto ambientales como económicos en las esferas local y mundial. Su enorme contribución al almacenamiento de carbono sugiere que la conservación y la restauración de estos ecosistemas podrían ser una vía que ayude a mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero.

La cuantificación de las emisiones de carbono emanadas de la conversión de manglares ha sido tarea difícil debido, en parte, a la falta de datos a gran escala en torno a la cantidad de carbono almacenado en estos ecosistemas, principalmente de manera subterránea, y a cómo otros usos del suelo pueden afectar estas reservas. La información sobre pérdidas en las reservas de carbono y emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con el uso del suelo es prácticamente inexistente, lo cual supone una barrera para establecer valores ambientales respecto de actividades de conservación o restauración emprendidas como parte de estrategias de mitigación o adaptación a los efectos del cambio climático.

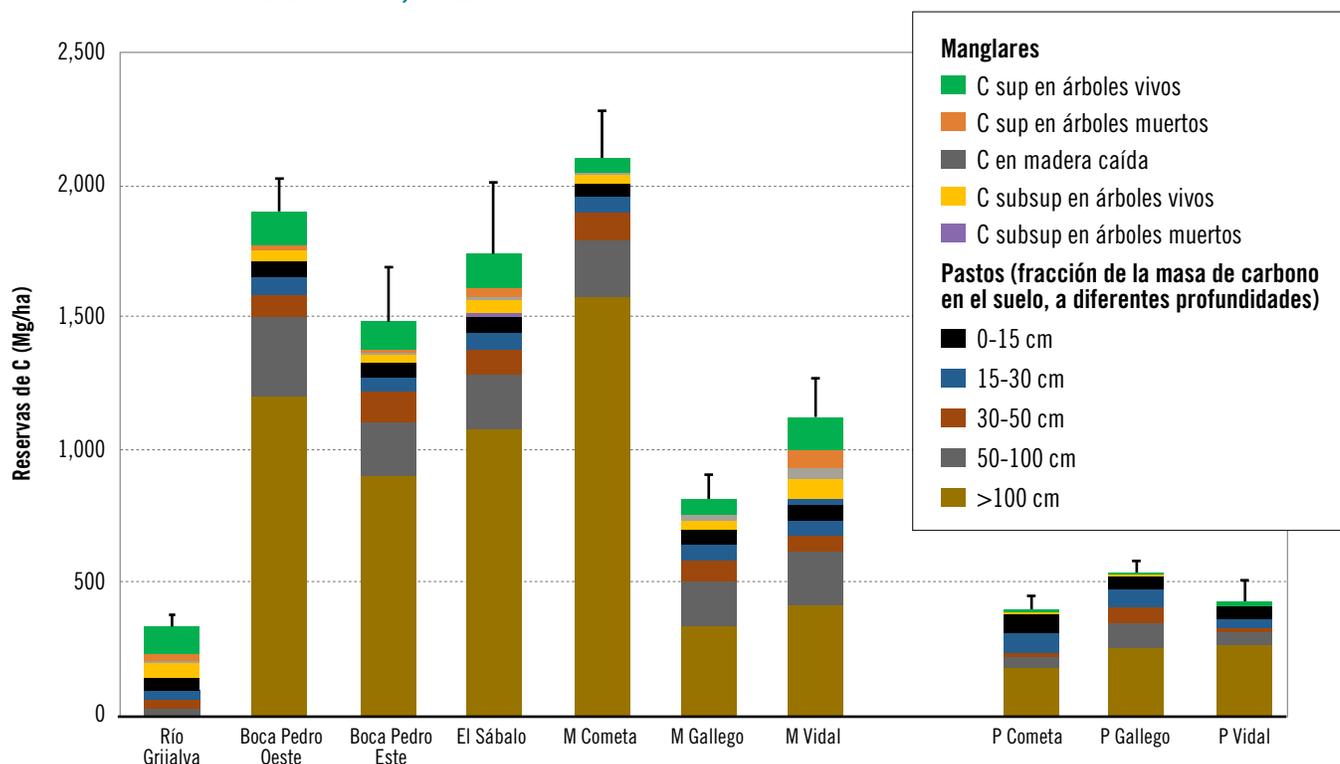
El primer objetivo del presente estudio fue cuantificar las reservas de carbono de los manglares oceánicos (en la franja costera) y estuarinos en Pantanos de Centla, México. El segundo objetivo estribó en investigar en qué forma la conversión de manglares a pastizales para ganado afecta la estructura y magnitud de estas reservas y cómo podría compararse con la conversión a tierras de pastoreo en bosques de altura. Se buscó responder a las siguientes preguntas de investigación específicas: ¿Cuál es el volumen de las reservas de carbono de

los manglares de Pantanos de Centla? ¿Qué diferencia hay entre los valores correspondientes a los manglares marinos (borde costero) y los de manglares estuarinos? ¿Qué reservas de carbono hay en los pastos para alimentación de ganado creados en sitios previamente ocupados por manglares? ¿Qué potencial de emisiones podría generarse con la conversión de manglares en pastos para ganado? Y, por último, ¿qué diferencia hay entre estas pérdidas de reservas de carbono y las relacionadas con la conversión de bosques tropicales de tierras altas en tierras de pastoreo?

Las reservas totales de carbono en los ecosistemas de manglares variaron considerablemente: desde un mínimo de 342 megagramos de carbono por hectárea (Mg C/ha) en el manglar Río Grijalva hasta un máximo de 2,099 Mg C/ha en el manglar Cometa (véase la gráfica 1), con un volumen medio de 1,358 Mg C/ha que contrasta con los 458 Mg C/ha correspondientes a pastos para ganado. En conjunto, las reservas de carbono de los sitios de manglar de donde se obtuvieron muestras para el presente estudio resultaron ser mayores que la media mundial registrada para todos los manglares (de aproximadamente 965 Mg C/ha). El manglar Río Grijalva presentó diferencias significativas respecto de los demás sitios en el extremo inferior, en tanto que los manglares Cometa, Boca Pedro Oeste y Boca Pedro Este registraron diferencias considerables en comparación con el resto de los sitios en el extremo superior. Los depósitos de carbono en el suelo dieron cuenta de una media de 86 por ciento de los depósitos totales del ecosistema, con un intervalo de entre 59 y 97 por ciento. En el caso de los pastizales para ganado, los suelos dan cuenta de más de 98 por ciento del total de reservas de carbono del ecosistema.

Las pérdidas en las reservas de carbono como resultado de la conversión de manglares en tierras de pastoreo (1,464 Mg CO₂ eq/ha) fueron siete veces superiores a las emisiones emanadas de la conversión de bosques secos y tres veces superiores a las emisiones resultantes de la conversión de selva amazónica en tierras de pastoreo.

Gráfica 1. Reservas de carbono del ecosistema de manglares y pastos para alimentación de ganado en Pantanos de Centla, México



Los resultados muestran las repercusiones y la gran influencia que el uso del suelo y su conversión tienen en las propiedades y estructura del suelo, en todo el perfil edáfico y a profundidades de más de un metro. En estas profundidades, los suelos en los pastizales registraron mayor densidad aparente, aunque menores concentración, densidad y masa de carbono. Sería conveniente realizar comparaciones con manglares intactos en profundidades similares, reconociendo las diferencias por colapso, compactación y erosión. Estos cambios en las propiedades del suelo también hacen más difícil determinar las pérdidas ocasionadas por cambios en la cubierta superficial. Debido a estos factores, las pérdidas de carbono en el suelo se determinaron comparándolas a las de una masa equivalente de suelo mineral de la capa edáfica superior —hasta un metro de profundidad— de los manglares, en vez de considerar la profundidad total. Esto derivó en una estimación de las emisiones emanadas de la conversión de manglares en pastos mucho más conservadora (1,464 Mg CO₂ eq/ha) que la media de 3,264 Mg CO₂ eq/ha obtenida con el enfoque de cambios en las reservas, en el que se consideran los mismos depósitos superficiales que suelos de hasta tres metros de profundidad (véase la gráfica 2). Es importante notar que al limitar las estimaciones de las pérdidas de carbono a una profundidad de un metro por debajo de la superficie —como se hizo en el presente estudio—, podrían estar subestimándose las pérdidas en estratos más profundos.

Resulta por demás claro que la conversión de manglares en otros usos del suelo supone un elevado costo por cuanto a las grandes cantidades de emisiones de gases de efecto invernadero generadas, así como por la pérdida de otros importantes servicios ambientales. Las grandes reservas de carbono en los manglares, junto con el elevado índice de deforestación de estos ecosistemas y las importantes emisiones de gases de efecto invernadero que se producen como consecuencia, subrayan la importancia de integrar el tema de la conservación de los manglares en las estrategias nacionales de mitigación y adaptación al cambio climático.

Manglares de Pantanos de Centla: una prioridad máxima

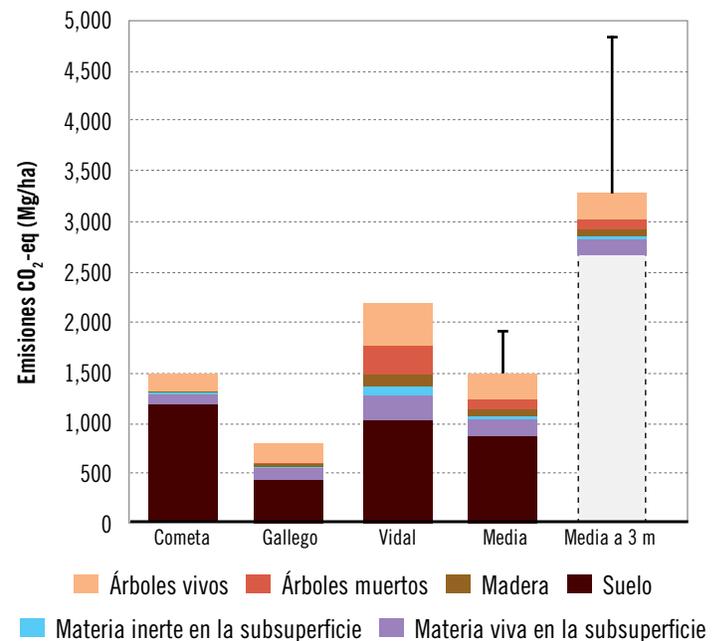
Los cambios en el uso del suelo, como la conversión de humedales en pastos para ganado, se traducen en importantes pérdidas de carbono del ecosistema y emisiones a la atmósfera. Las pérdidas de carbono por causa de la conversión de manglares en tierras de pastoreo son extremadamente altas comparadas con las que resultan de la conversión en otros usos del suelo.

En virtud de la magnitud de sus reservas de carbono, las significativas emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con el cambio en su uso del suelo, el elevado índice de deforestación que padecen y los numerosos servicios ambientales que prestan, los manglares de Pantanos de Centla deben considerarse una de las máximas prioridades a incluir en estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático.

Científicos de la Universidad Estatal de Oklahoma y la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco han integrado un sólido equipo de cooperación para llevar a cabo relevantes investigaciones en torno al carbono azul en la costa sureste del golfo de México (específicamente en Pantanos de Centla). Esta importante y amenazada región brinda enormes oportunidades en términos de investigación, educación y divulgación.

Dada la importancia que los ecosistemas de Pantanos de Centla (al igual que las zonas costeras de Campeche, Tabasco y Veracruz) revisten

Gráfica 2. Emisiones generadas por la conversión de manglares en tierras de pastoreo: a 1 m de profundidad con base en la equivalencia de biomasa, y a 3 m a partir del enfoque de cambios en las reservas



en el ámbito subcontinental; las amenazas a su persistencia, y las significativas emisiones que se generan cuando estos ecosistemas que captan y almacenan carbono azul son objeto de conversión, se ameritan estudios ulteriores en torno a su ecología, gestión y conservación.

Entre las necesidades de investigaciones futuras se incluyen las siguientes:

- Muestreo de suelos en humedales más allá de un metro de profundidad a fin de estudiar todos los efectos del uso del suelo, de los cambios en el mismo, y de la silvicultura.
- Medición de reservas de carbono en otros ecosistemas que captan y almacenan carbono azul en la región de Pantanos de Centla, especialmente marismas y bosques aluviales.
- Cuantificación de emisiones emanadas del cambio en el uso de suelo de manglares y otros ecosistemas costeros (es decir, marismas).
- Determinación de índices de captación y acumulación de carbono a partir de la restauración de manglares degradados.
- Facilitación de oportunidades de práctica e investigación para egresados universitarios en México interesados en la dinámica del carbono azul.

Publicaciones del proyecto

Kauffman J. B., H. Hernández Trejo, J. García, C. Heider y W. M. Contreras (2015), “Carbon stocks of mangroves and losses arising from their conversion to cattle pastures in the Pantanos de Centla, Mexico” [Reservas de carbono en manglares y pérdidas ocasionadas por su conversión en pastos para alimentación de ganado en Pantanos de Centla, México], *Wetlands Ecology and Management*, agosto de 2015. *Cuantificación de las reservas de carbono orgánico en el suelo en ocho ecosistemas de marismas del Sistema Nacional de Reservas para la Investigación Estuarina de Estados Unidos.*

Cuantificación de las reservas de carbono orgánico en el suelo en ocho ecosistemas de marismas del Sistema Nacional de Reservas para la Investigación Estuarina de Estados Unidos

Estos hallazgos inciden en la forma de calcular los balances de carbono a escala de marismas completas e incorporarlos en las políticas en materia de carbono azul.

Investigadores principales:

Kristin Wilson Grimes (profesora adjunta de investigación, Universidad de las Islas Vírgenes, y directora del Instituto de Investigaciones sobre Recursos Hídricos de las Islas Vírgenes [*Virgin Islands Water Resources Research Institute*]) y **Erik Smith** (coordinador de investigación, Reserva Nacional para la Investigación Estuarina Ensenada Norte-Bahía Winyah [*North Inlet-Winyah Bay National Estuarine Research Reserve*] y profesor adjunto, Universidad de Carolina del Sur)



NERR, Wells



NERR, Delaware



NERR, Grand Bay



NERR, Lake Superior



NERR, bahía de San Francisco



NERR, North Inlet-Winyah Bay

Variabilidad del almacenamiento de carbono en marismas estadounidenses

El Sistema Nacional de Reservas para la Investigación Estuarina (*National Estuarine Research Reserve System*, NERRS) de Estados Unidos comprende una red de 28 sitios protegidos en todo el territorio de Estados Unidos que cuentan con el respaldo de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (*National Oceanic and Atmospheric Administration*, NOAA). El propósito de la red es proteger y restaurar ecosistemas costeros mediante la investigación integrada, la protección ambiental, la educación y la formación de alianzas comunitarias. El presente proyecto de investigación se propuso examinar la variabilidad espacial del almacenamiento de carbono al interior de las marismas pertenecientes al NERRS en Maine, Delaware, Carolina del Sur, Florida, Misisipi, California, Wisconsin y Ohio, y también entre éstas. Asimismo, se cuantificaron el porcentaje de materia orgánica en el suelo, el contenido porcentual de carbono orgánico y la variabilidad en la densidad del carbono sedimentario en los primeros 20 cm de la capa edáfica superior de un grupo de marismas que difieren en cuanto a contextos geomorfológicos, vegetación dominante y salinidad. Los resultados ayudan a pronosticar las reservas de carbono en marismas que experimentan condiciones ambientales en constante cambio y están sometidas a factores de estrés antropogénico, y en las que no se tiene acceso a tecnologías, procesos de análisis y experiencia de costo elevado o incluso prohibitivo.

Este proyecto de investigación se llevó a cabo con el apoyo de la Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA) en el marco del proyecto *Carbono azul en América del Norte: evaluación del papel de los hábitats costeros en el balance de carbono del subcontinente* (Plan Operativo 2013-2014).

Resumen del proyecto

Esta investigación subsana vacíos críticos en el conocimiento sobre la variabilidad espacial en la densidad del carbono orgánico contenido en la capa superior del suelo (hasta 20 cm de profundidad) a lo largo y ancho de una gama de sitios pertenecientes al Sistema Nacional de Reservas para la Investigación Estuarina (*National Estuarine Research Reserve System*, NERRS) de Estados Unidos y localizados en Maine, Delaware, Carolina del Sur, Florida, Misisipi, California, Wisconsin y Ohio. Los sitios seleccionados para la ejecución del estudio representan en conjunto toda una gama de marismas: desde aquéllas de agua dulce (Wisconsin y Ohio) hasta las de elevada salinidad (Maine, Carolina del Sur, Florida y Misisipi), pasando por las salitrales (Delaware y California), con características sumamente variables en cuanto a contexto geomorfológico y comunidades vegetales predominantes. El propósito al incluir esta gama de marismas fue obtener cálculos más precisos de la densidad del carbono sedimentario en todos los tipos de marisma, así como lograr un entendimiento más claro en torno a la posibilidad de extrapolar la metodología de pérdida por calcinación a todos los hábitats de marismas de América del Norte

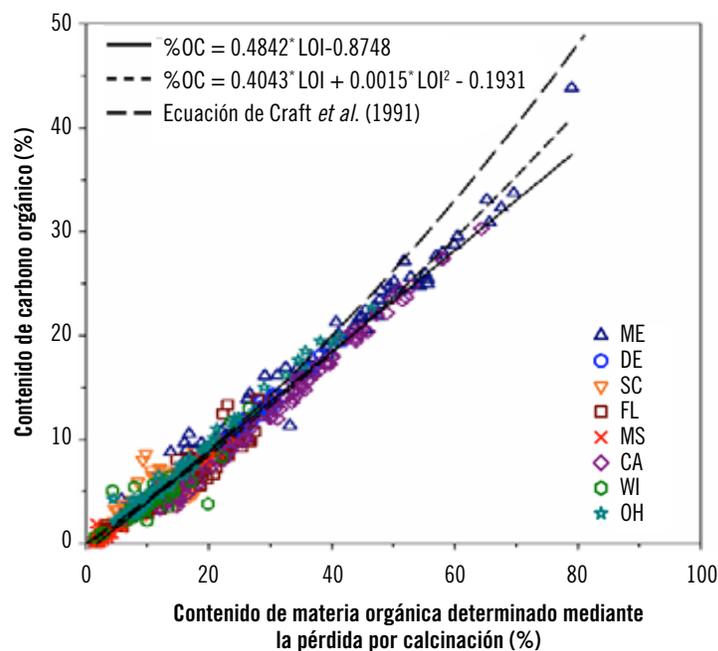
En cada uno de los ocho sitios seleccionados, se recogieron al azar 20 núcleos de 7.62 cm de diámetro y 20 cm de longitud de entre los cuatro tipos de vegetación dominante. Estos núcleos se dividieron y procesaron a fin de obtener pares de muestras para un análisis del porcentaje de materia orgánica presente en los sedimentos mediante el método de pérdida por calcinación, así como un análisis elemental del contenido porcentual de carbono orgánico en intervalos homogeneizados de 5 cm de profundidad. Con base en las mediciones del contenido porcentual de carbono y la densidad aparente en seco, se calculó la densidad del carbono sedimentario para los diferentes sitios, zonas de marismas y tipos de vegetación, y se compararon los valores entre sí.

Los resultados demuestran que tanto la materia orgánica en sedimentos, determinada a partir del método de pérdidas por calcinación, como el contenido porcentual de carbono orgánico sedimentario, están estrechamente correlacionados; que la relación global difiere de aquella planteada en otros estudios publicados (por ejemplo, Craft *et al.*, 1991; Callaway *et al.*, 2012) (gráfica 1), y que las características de los sitios individuales contribuyen de manera significativa a las variaciones en esta relación global. En escalas espaciales amplias, una sola curva capta adecuadamente gran parte de la variabilidad registrada en el carbono orgánico sedimentario. Los resultados de este estudio muestran que, a escalas más finas, en algunas regiones la variabilidad en las propiedades de los sedimentos puede, no obstante, dictar el uso de curvas de calibración específicas para cada sitio.

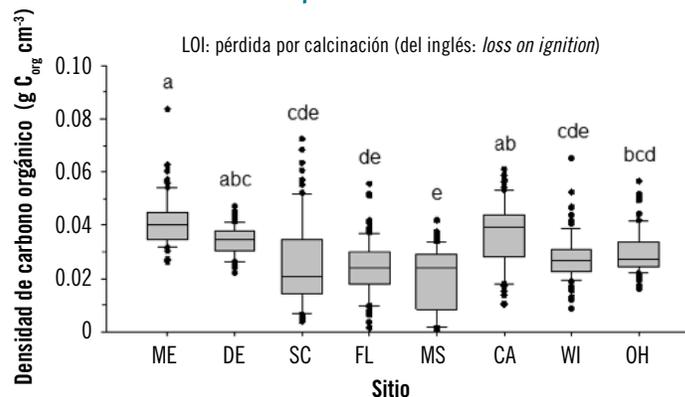
Los resultados obtenidos de un análisis de punto de ruptura revelaron un cambio en la relación entre el contenido de carbono orgánico y la densidad aparente para un contenido de carbono orgánico de 2.04 por ciento. Por encima de este valor, la relación resultó altamente significativa y registró una pendiente muy similar a las observadas en estudios previos. Por debajo de este valor, la relación no fue estadísticamente significativa. Cabe señalar que las muestras con contenido de carbono orgánico inferior a 2.04 por ciento correspondieron casi exclusivamente a sitios del sureste de Estados Unidos (Carolina del Sur, Florida y Misisipi) y, en gran medida, se confinaron a zonas de vegetación halófila o de la variante corta de *Spartina alterniflora* en la parte media de las marismas (no se presentan los datos en esta sinopsis).

La densidad media del carbono orgánico sedimentario en los primeros 20 cm de la capa superior osciló entre 0.001 y 0.061 g C/cm⁻³, con una media general de 0.030 ± 0.011 g C/cm⁻³, y difirió considerablemente de un sitio a otro (véase la gráfica 2). Los sedimentos de Maine y California registraron un contenido de carbono orgánico por centímetro cúbico significativamente mayor que los de otros sitios muestreados. La densidad media de carbono orgánico en sedimentos también difirió considerablemente entre zonas de marismas altas y bajas en Carolina del Sur, Misisipi y Florida, aunque el patrón de esta diferencia no fue uniforme. En Misisipi, la zona de marismas bajas registró una densidad de carbono orgánico considerablemente

Gráfica 1. Contenido de carbono orgánico en sedimentos (%) en comparación con el contenido de materia orgánica determinado mediante la pérdida por calcinación (%)



Gráfica 2. Distribución de la densidad de carbono orgánico al interior y entre ocho sitios de marismas pertenecientes al NERRS



Nota: Los valores mediantes se indican mediante una línea horizontal; las cajas contienen los cuartiles 25 y 75; los bigotes corresponden a los percentiles 10 y 90, y los valores atípicos se indican con puntos. Los sitios con la misma letra no presentan diferencias considerables entre sí ($p > 0.05$). Las abreviaturas de los estados indican la ubicación del sitio.

mayor que la de la zona de marismas altas, mientras que en Carolina del Sur y California se observó el patrón opuesto. En la mitad de los sitios muestreados (Maine, Misisipi, California y Carolina del Sur), la densidad media del carbono orgánico sedimentario difirió considerablemente en función de la vegetación (no se presentan los datos). Estos resultados revelan una significativa variación espacial en términos de la densidad del carbono orgánico sedimentario en la capa edáfica superior (hasta 20 cm) al interior de una misma marisma. Superficialmente, estas diferencias pueden observarse en el montaje fotográfico de la gráfica 3.

Con todo, no se detectó una relación significativa entre las mediciones de la densidad del carbono orgánico en sedimentos y la biomasa total sobre el suelo, lo mismo al interior de los sitios que entre ellos, por lo que la biomasa en pie en las distintas comunidades vegetales no podría dar cuenta de las diferencias observadas en la densidad del carbono orgánico sedimentario entre una comunidad y otra. Combinados, estos hallazgos repercuten en los cálculos de los balances de carbono a escala de marismas completas.

Este estudio permitió aumentar en forma significativa el número de sitios en todo Estados Unidos para los que se dispone de mediciones de la densidad de carbono en sedimentos, así como mejorar nuestra comprensión de las metodologías basadas en la pérdida por calcinación como valor sustituto para determinar el contenido de carbono orgánico en sedimentos. Los resultados sugieren que en algunas regiones es necesario recurrir a curvas de calibración específicas que correlacionen la materia orgánica con el contenido de carbono en sedimentos, y también que se observan diferencias significativas en la densidad del carbono orgánico sedimentario en los primeros 20 cm del suelo por sitio, zona y tipo de vegetación. Cabe destacar que estas diferencias al interior de una misma marisma y entre las diversas marismas inciden en la forma de calcular los balances de carbono a escala de marismas completas e incorporarlos en las políticas en materia de carbono azul.

Ampliación de los trabajos sobre carbono azul en humedales de América del Norte

Como parte de trabajos ulteriores, deberá expandirse aún más el número de lugares en que se lleven a cabo mediciones de la densidad

de carbono en sedimentos, así como explorarse en qué grado se requieren curvas adicionales de calibración específicas para una región. Los estudios futuros habrán de explorar cambios en la densidad del carbono sedimentario en función de la profundidad mediante la recolección de núcleos más largos, lo que a su vez permitirá obtener cálculos más precisos de los balances de carbono a escala de marismas completas. Las 28 reservas que conforman el Sistema Nacional de Reservas para la Investigación Estuarina (*National Estuarine Research Reserve System*, NERRS) pueden ser excelentes socios si se busca expandir la labor sobre carbono azul en humedales protegidos de Estados Unidos que comprendan una amplia gama de tipos de marisma, regímenes de gestión y agentes naturales y antropogénicos de presión.

Asimismo, podrían explorarse los cambios en dicha densidad en función de la profundidad (>20 cm) mediante la recolección de núcleos más largos con los cuales sea posible obtener cálculos más precisos de los balances de carbono a escala de marismas completas. Esta investigación ulterior sobre la variabilidad espacial en las mediciones de la densidad del carbono podría después vincularse con mapas de hábitats de marismas de alta resolución.

Referencias

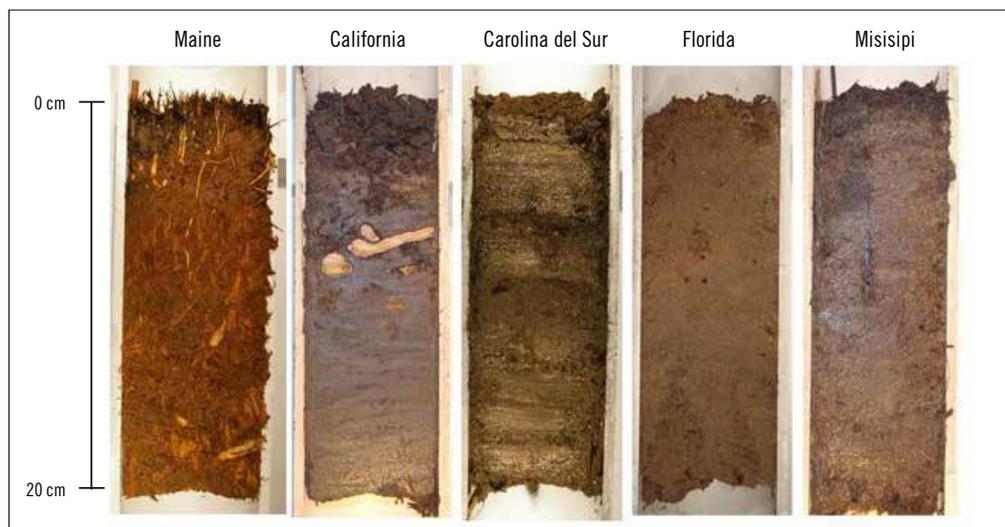
Callaway, J. C., E. L. Borgnis, R. E. Turner y C. S. Milan (2012), "Carbon sequestration and sediment accretion in San Francisco Bay tidal wetlands" [Captación y almacenamiento de carbono y acreción sedimentaria en humedales intermareales en la bahía de San Francisco], *Estuaries and Coasts*, núm. 35, pp. 1163-1181.

Craft, C. B., E. D. Seneca y S. W. Broome (1991), "Loss on ignition and Kjeldahl digestion for estimating organic carbon and total nitrogen in estuarine marsh soils: calibration with dry combustion" [Pérdida por ignición y método Kjeldahl por digestión para calcular el carbono orgánico y el nitrógeno total en suelos de marismas estuarinos: calibración con combustión seca], *Estuaries*, núm. 14(2), pp. 175-179.

Blum, L.K. 1993. "Spartina alterniflora root dynamics in a Virginia marsh". *Mar. Ecol. Prog. Ser.* núm. 102, pp. 169-178.

Kirwan *et al.* 2013. "The impact of sea-level rise on organic matter decay rates in Chesapeake Bay brackish tidal marshes". *Biogeosciences* núm. 10, pp. 1869-1876.

Gráfica 3. Núcleos de cinco marismas del NERRS muestreadas



Fotos: K. Wilson Grimes

Cuantificación de las reservas de carbono en lechos de pasto marino en el golfo de México, desde la punta de Florida hasta Veracruz, México

Este estudio permitió demostrar la abundancia de reservas de carbono azul en el golfo de México, sobre todo en sitios restaurados.

Investigadores principales:

Anitra Thorhaug (presidenta, Fundación sobre Energía y Medio Ambiente del Gran Caribe [*Greater Caribbean Energy and Environment Foundation*]), **Helen Poulos** (investigadora titular docente de posdoctorado, Universidad Wesleyana) y **Jorge López Portillo Guzmán** (Instituto de Ecología, A.C. [Inecol], Xalapa, México)



Muestra de núcleo obtenida de un lecho de pasto marino restaurado en la que se observan evidentes cambios de color entre la parte superior y la inferior, así como la transición de sedimentos finos a gruesos; además, se percibe el olor de la descomposición anaerobia.

Este proyecto de investigación se llevó a cabo con el apoyo de la Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA) en el marco del proyecto *Carbono azul en América del Norte: evaluación del papel de los hábitats costeros en el balance de carbono del subcontinente* (Plan Operativo 2013-2014).

Pérdidas y acumulación de carbono orgánico en lechos de pasto marino, en el golfo de México

Este estudio consistió en comparar las reservas de carbono (materia orgánica, contenido de carbono orgánico y densidad de carbono) en los primeros 20 cm de la capa superior de sedimentos en lechos de pasto marino: i) naturales y ii) restaurados en toda una gama de ubicaciones geográficas y edades de restauración. Se obtuvieron, además, núcleos en: iii) sitios contaminados sin vegetación que alguna vez tuvieron lechos de pasto marino, pero que nunca se restauraron, y iv) sitios que siempre carecieron de vegetación, lo que permitió cuantificar las pérdidas totales y anuales de carbono originadas por contaminación, y también calcular la acumulación de carbono orgánico como resultado de tareas de restauración de lechos de pasto marino en el golfo de México. Los resultados representan el primer conjunto exhaustivo de valores medidos para determinar tanto las pérdidas de carbono orgánico en lechos de pasto marino a causa de episodios de contaminación en el golfo de México, como la acumulación de carbono gracias a la restauración de este tipo de ecosistemas. Estos resultados revisten una gran importancia porque cubren una cuenca oceánica regional de enorme relevancia: la del gran mar del Caribe.

Resumen del proyecto

Como parte de este proyecto se midió el carbono orgánico captado y almacenado en nueve sitios de lechos de pastos marinos restaurados, situados en el golfo de México, en una de las regiones más ricas en carbono de América del Norte, que contiene 45 por ciento del balance de carbono del subcontinente (Hofmann *et al.*, 2011; Herrmann *et al.*, 2015). Las mediciones realizadas en campo de diversos componentes del carbono azul en lechos de pasto marino

—lo mismo naturales que restaurados— en el golfo de México, desde la punta más al sureste de Florida, Estados Unidos, hasta Veracruz, en México, muestran cantidades elevadas de carbono almacenado. Se extrajeron muestras de núcleos de 7.5×20 cm por cuadruplicado a lo largo de una línea de 30 m en sitios de lechos de pasto marino sin vegetación; en sitios contaminados y, por ello, desprovistos de vegetación; en sitios de pastos marinos restaurados, y en praderas marinas naturales (a una distancia de cuando mucho 650 m de prados restaurados). Estas muestras se mantuvieron constantemente frías durante todo el procesamiento con el propósito de retardar la degradación microbológica. Se procesaron y analizaron secciones de los núcleos para determinar los contenidos de carbono orgánico (C_{org}) y $CaCO_3$ (un componente importante del hábitat de lechos de pasto marino y fuente de carbono inorgánico derivado de material de concha), la proporción de carbono con relación al nitrógeno (C:N) y la textura de los sedimentos; además, se realizaron comparaciones estadísticas. Los primeros resultados globales obtenidos con base en cálculos a pequeña escala y por sitio de las pérdidas de reservas de carbono en los núcleos de 20 cm, considerados conjuntamente con las fechas de los episodios de contaminación de los sitios, indican que la destrucción del sistema y la muerte de *Thalassia testudinum* y *Halodule wrightii* generan una liberación promedio de carbono $1.13 \text{ Mg } C_{org} \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Estas pérdidas de carbono comienzan inmediatamente a revertirse tras la restauración del lecho. Por cuanto a las dos especies principales —*Thalassia testudinum* y *Halodule wrightii*—, las tareas de restauración dan lugar a una acumulación promedio de carbono orgánico de $6.4 \text{ Mg } C_{org} \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para todas las edades de restauración, calculada con base en estimaciones por sitio obtenidas a partir de la diferencia entre el contenido de C_{org} en prados restaurados y de naturales, dividida entre el número de años transcurridos desde la restauración. Cabe observar que el promedio de C_{org} captado y almacenado en Texas en todos los sitios restaurados después de 15 años fue menor que la sedimentación anual registrada para los sitios restaurados en el extremo meridional de Florida, donde se había acumulado carbono a lo largo de un periodo de 35 a 42 años luego de la restauración.

Las reservas de carbono existentes desde la punta del sur de Florida hasta la frontera del río Bravo, determinadas a partir de distintas mediciones de alcance estatal y federal, ascendieron a unos $24.3 \text{ Tg } C_{org}$. Las reservas existentes estimadas con base en datos limitados sobre la distribución de pastos marinos en las entidades de la república mexicana hasta el extremo meridional de Veracruz alcanzan los $1,765 \text{ Mg } C_{org}$, cantidad considerablemente inferior a la registrada, por ejemplo, en los estuarios adyacentes en Texas ($1,765 \text{ Gg versus } 24,300 \text{ Gg}$). Por otra parte, las pérdidas observadas entre la frontera del río Bravo y la punta sur de Florida oscilan alrededor de $17.9 \text{ Tg } C_{org}$ (también con base en aproximaciones y mediciones de alcance federal y estatal de la extensión de las pérdidas). Los resultados del proyecto apuntan a que aproximadamente 33 por ciento del carbono originalmente almacenado en las praderas marinas de la región estadounidense del golfo de México se ha ido eliminando en los últimos 75 años como resultado de actividades humanas.

Valores medidos para sitios naturales, contaminados, restaurados y sin vegetación

La media de las reservas totales de carbono orgánico fue de $36.8 \text{ Mg } C_{org} \text{ ha}^{-1}$ para lechos de pasto marino restaurados y de $24.9 \text{ Mg } C_{org} \text{ ha}^{-1}$ para lechos naturales, ambas calculadas a partir de núcleos de 20 cm de longitud (tomando la suma de valores en todo el perfil de profundidad para cada núcleo). En los sitios restaurados, el porcentaje de

carbono orgánico aumentó con el paso del tiempo desde la restauración (véase la gráfica 1). Por su parte, los episodios de contaminación en lechos de pasto marino ocasionaron una pérdida promedio de $20.0 \text{ Mg } C_{org} \text{ ha}^{-1}$, que se calculó restando el carbono captado y almacenado en lechos de pasto marino naturales en cada uno de los sitios, de la diferencia resultante entre el carbono captado y almacenado en sitios que siempre carecieron de vegetación y en sitios sin vegetación a causa de la contaminación (los valores anuales se dividieron entre el número de años transcurridos desde el episodio de contaminación). Las tareas de restauración son responsables de una acumulación promedio de $20.3 \text{ Mg } C_{org} \text{ ha}^{-1}$ de carbono orgánico ($6.43 \text{ Mg } C_{org} \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$), calculada a partir de la diferencia, para cada uno de los sitios, entre el C_{org} registrado en pastos marinos restaurados y aquel en suelos contaminados y sin vegetación (los valores anuales se dividieron entre los años transcurridos desde la restauración).

La densidad de carbono orgánico considerablemente mayor en sitios restaurados en comparación con la de lechos de pasto marino naturales puede explicarse en virtud de las descargas de aguas residuales y operaciones de dragado y relleno, aunadas a la contaminación térmica (véase la gráfica 2).

Con base en estos hallazgos experimentales, se calcula que la pérdida de carbono ocasionada por la destrucción o muerte de lechos de pasto marino en la porción estadounidense del golfo de México ha sido de aproximadamente $16.6 \text{ Tg } C_{org}$ (con base en las pérdidas promedio de carbono ajustadas en lechos de pasto marino) desde la Segunda Guerra Mundial. Se tiene registrada una pérdida de $8.3 \text{ Tg } C_{org}$ en Florida, $8.1 \text{ Tg } C_{org}$ en Texas, $0.05 \text{ Tg } C_{org}$ en Luisiana, $0.02 \text{ Tg } C_{org}$ en Misisipi y $0.02 \text{ Tg } C_{org}$ en Alabama. Proporcionalmente (respecto de la reserva original existente), se observaron mayores pérdidas en lugares como Luisiana y Alabama (con franjas costeras mucho más cortas) porque estos estados han experimentado una destrucción masiva de pastos marinos en las últimas dos décadas, a pesar de las políticas ambientales en vigor.

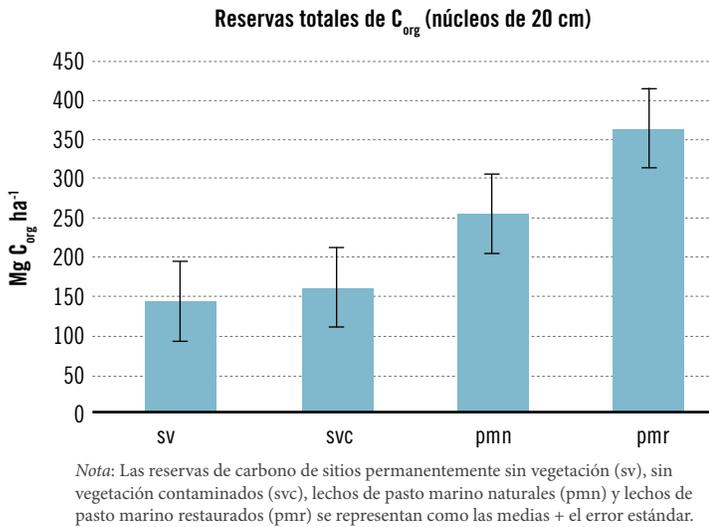
Importancia de la restauración de lechos de pasto marino en la mitigación del cambio climático

Los resultados sugieren que la restauración de lechos de pasto marino constituye una importante estrategia de mitigación del cambio climático que puede compensar flujos de carbono orgánico a gran escala en estos ecosistemas, observados en respuesta a episodios de contaminación en todo el golfo de México. Con este estudio se demuestra que las reservas de carbono azul en el golfo de México son abundantes, sobre todo en sitios restaurados. Aunque el carbono captado y almacenado en lechos de pasto marino se ha perdido en un contexto de negligencia predominante a lo largo del pasado siglo en todas las regiones del golfo de México y en otras partes, esta tendencia es reversible.

Prioridades de investigación para medir carbono orgánico en lechos de pasto marino

En el futuro podrían tomarse núcleos de mayor longitud (1 m) con el propósito de mejorar los cálculos del balance de carbono a escala de praderas marinas completas. Asimismo, podrían realizarse mediciones del contenido de carbono en lechos de pasto marino en la costa oeste de Canadá y las costas de California y Oregón. Podrían muestrearse, además, diferentes sitios en la costa oeste de México (desde el mar de Cortés hasta la frontera con Guatemala), así como en varios estuarios importantes del norte de la península de Yucatán, a fin de determinar el carbono

Gráfica 1. Reservas totales de carbono orgánico con base en núcleos de 20 cm en lechos de pasto marino del golfo de México



almacenado en lechos de pasto marino estuarinos. También será necesario llevar a cabo investigaciones ulteriores sobre carbono azul en las regiones norte y noreste del golfo de México.

Con base en otras investigaciones podría evaluarse la contribución de distintos componentes del carbono orgánico en lechos de pasto marino, plancton y manglares a la capacidad de captación y almacenamiento de carbono orgánico e inorgánico en distintas zonas occidentales y orientales del golfo de México, así como en las costas del Atlántico y del Pacífico. Habrá que definir con mayor claridad los componentes de captación y almacenamiento en lechos de pasto marino y efectuar comparaciones regionales en el golfo de México, principalmente ante la posibilidad de que la región presente una variabilidad espacial y temporal considerable en cuanto a reservas y

flujos de carbono. Por último, las iniciativas en la materia habrán de centrarse en la identificación de áreas estables para la restauración de lechos de pasto marino con buenas posibilidades de generar los resultados deseados a largo plazo en términos de sustentabilidad.

Asimismo, se ameritan esfuerzos conjuntos en México a fin de medir el carbono en las regiones del sur del golfo de México. Estas acciones se beneficiarían de la transferencia de tecnología y pruebas experimentales con fines de restauración, sobre todo en estuarios donde pueden observarse grandes estragos, que registran recolonización de pesquerías y para los que se cuenta con mediciones de carbono almacenado.

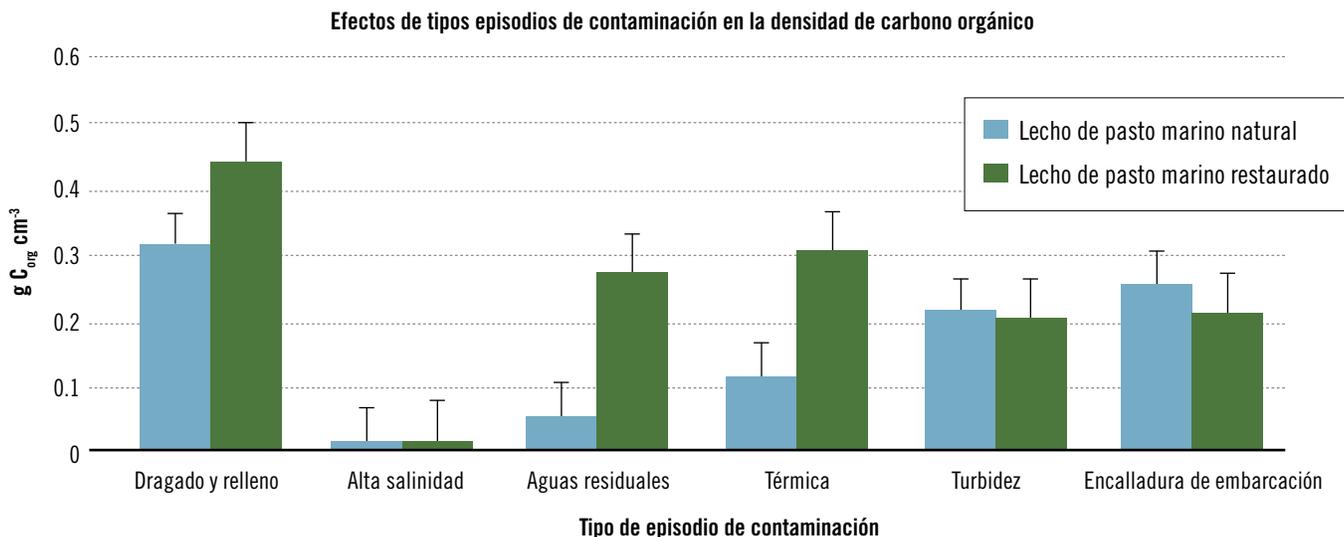
Análisis de los componentes del ciclo del carbono azul en lechos de pasto marino, aunados a comparaciones entre el carbono almacenado en sistemas de pastos marinos y aquel contenido en manglares en el golfo de México, y más ampliamente en América del Norte, contribuirían a lograr avances científicos y formular políticas en materia de carbono azul. La restauración de lechos de pasto marino sin duda favorece la captación y el almacenamiento de carbono y también deviene una herramienta económica que pueden adoptar el sector industrial, fundaciones y gobiernos.

Referencias

Herrmann, M., R. G. Najjar, W. M. Kemp, S. L. McCallister, R. B. Alexander, W. J. Cai, P. Griffith y R. A. Smith (2015), “Net ecosystem production and organic carbon balance of US East Coast Estuaries” [Producción neta de ecosistemas y balance de carbono orgánico en estuarios de la costa este de Estados Unidos], *Global Biogeochemical Cycles*, en prensa.

Hofmann, E. E., B. Cahill, K. Fennel, M. A. M. Friedrichs, K. Hyde, C. Lee, A. Mannino, R. G. Najjar, J. E. O’Reilly, J. Wilkin y J. Xue (2011), “Modeling the dynamics of continental shelf carbon” [Modelización de la dinámica del carbono en la plataforma continental], *Annual Review of Marine Science*, núm. 3, pp. 93-122.

Gráfica 2. Efectos de tipos de episodios de contaminación en la densidad de carbono orgánico en lechos de pasto marino muestreados



Nota: Densidad media de carbono orgánico (+ error estándar) para lechos de pasto marino naturales en comparación con los restaurados en el contexto de distintos tipos de episodios de contaminación y perturbación en el golfo de México. Se registran valores promedio para todas las profundidades de muestra.

Índices de acumulación de carbono en el suelo en marismas y su respuesta al aumento en el nivel del mar

Se anticipa que las marismas podrán captar y almacenar carbono a ritmo aún más rápido en el futuro, lo que aumenta la importancia de las acciones en favor de su protección y restauración.

Investigador principal:

Matthew Kirwan (profesor adjunto, Instituto de Ciencias Marinas de Virginia [*Virginia Institute of Marine Science*])



Este proyecto de investigación se llevó a cabo con el apoyo de la Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA) en el marco del proyecto *Carbono azul en América del Norte: evaluación del papel de los hábitats costeros en el balance de carbono del subcontinente* (Plan Operativo 2013-2014).

Metaanálisis de la acumulación de carbono e índices históricos de aumento en el nivel del mar

La importancia de las marismas por cuanto a su capacidad para captar y almacenar carbono se reconoce ya ampliamente. Esta función ambiental, sin embargo, se ve afectada por numerosos factores locales, como el contenido de nutrientes y el clima, lo que dificulta aislar la repercusión específica que el aumento en el nivel del mar tiene en la captación y el almacenamiento de carbono a escala geográfica amplia.

Resumen del proyecto

Como parte de este proyecto, se llevó a cabo un metaanálisis que vincula los índices de acumulación de carbono en 112 marismas costeras de América del Norte —a partir de datos obtenidos de informes y artículos de investigación publicados— con índices históricos de aumento en el nivel del mar en las costas del Atlántico y el Pacífico de Canadá y Estados Unidos. Se partió de la hipótesis de que los índices de acumulación de carbono en las marismas se incrementan en respuesta al aumento en el nivel del mar, con lo que se refuerza la función que estos ecosistemas que captan y almacenan carbono azul desempeñan en la regulación del clima mundial. Para comprobar esta hipótesis, se compiló información que comprende 88 cálculos de índices de acumulación en marismas en Canadá y Estados Unidos sujetas a índices espacialmente variables de aumento histórico relativo en el nivel del mar, que oscilan entre 2 y 10 mm al año⁻¹.

La base de datos integrada con los índices de acumulación de carbono en el suelo comprende 40 sitios localizados en la costa canadiense del Atlántico, 24 sitios ubicados en la costa del Atlántico en Estados Unidos, 17 sitios en la costa estadounidense del golfo de México y siete más en la costa del Pacífico en Estados Unidos.



Se encontró que los índices de acumulación de carbono varían entre 21 y 928 $\text{g m}^{-2} \text{año}^{-1}$, en tanto que los índices de aumento relativo del nivel del mar a largo plazo se ubicaron entre 2.00 y 9.65 mm año^{-1} . Cabe señalar que la mayoría de las marismas en América del Norte registradas en esta base de datos han experimentado índices históricos de aumento en el nivel del mar de entre 2 y 4 mm año^{-1} ; sin embargo, sitios ubicados cerca del delta del río Misisipi se están hundiendo con rapidez, por lo que numerosas marismas en la costa del golfo han experimentado índices de aumento relativo del nivel del mar de 9-10 mm año^{-1} . Así, puede observarse una fuerte influencia geográfica en los índices de aumento del nivel del mar.

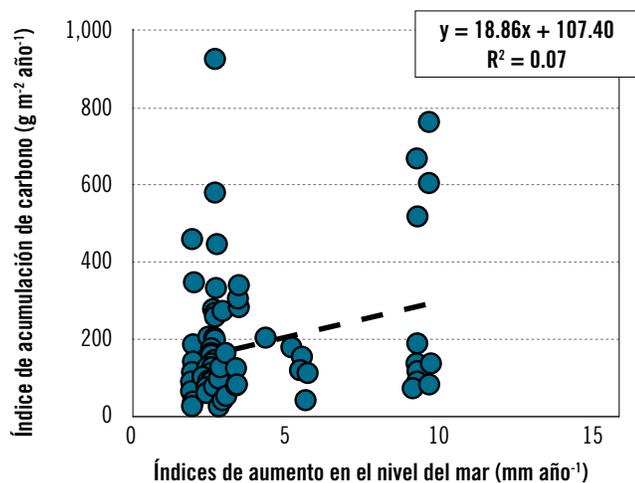
Un simple análisis de todo el conjunto de datos sugiere que los índices de acumulación de carbono en el suelo en estas marismas no guardan una correlación significativa con las variaciones espaciales en el aumento relativo en el nivel del mar (véase la gráfica 1). Aunque la regresión lineal apunta a una tendencia ligeramente positiva, la

relación es altamente variable ($r^2 = 0.07$) y estadísticamente insignificante ($p > 0.1$). El rango completo de índices de acumulación de carbono (21-928 $\text{g m}^{-2} \text{año}^{-1}$) se registró en un rango reducido de índices de aumento relativo en el nivel del mar (2.75-2.82 mm año^{-1}). La variabilidad al interior de una sola región geográfica también fue elevada. Por ejemplo, los índices de acumulación de carbono correspondientes a doce sitios en la región del delta del río Misisipi en Luisiana van desde 71 hasta 763 $\text{g m}^{-2} \text{año}^{-1}$; todos estos sitios están sujetos a índices rápidos en el aumento relativo del nivel del mar (9.24-9.65 mm año^{-1}). Estos resultados llevan a plantearse que son otros factores, distintos del aumento del nivel del mar, los que más bien podrían tener una influencia preponderante en los índices de acumulación de carbono en el suelo de las marismas.

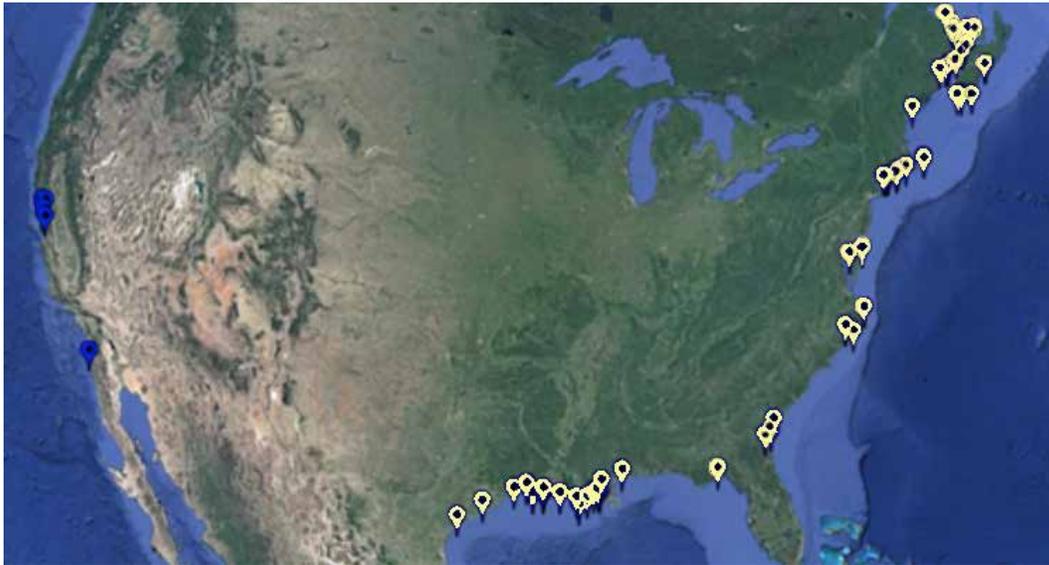
Ya se ha observado que la frecuencia de inundaciones y sus repercusiones en el tipo de vegetación influyen en los índices de acumulación de carbono en el suelo al interior de marismas individuales. Por ejemplo, los índices de acumulación de carbono en porciones de una marisma de poca elevación que se inundan con frecuencia son normalmente más altos que los observados en porciones de gran elevación que se inundan con poca frecuencia (Ouyang y Lee, 2014). Estos patrones pueden atribuirse directamente a la influencia de las inundaciones en la producción de raíces, pues la descomposición de materia orgánica no resulta altamente vulnerable a las inundaciones (Blum, 1993; Kirwan *et al.*, 2013). Aun si el análisis indica que la variabilidad entre marismas es alta, parte de esta variación puede explicarse por las diferencias en cuanto a la frecuencia de inundaciones, determinada a partir del tipo de vegetación.

Restringir el análisis a subconjuntos de datos con base en el tipo de vegetación no permitió derivar una relación significativa entre el índice de acumulación de carbono en el suelo y el índice de aumento del nivel del mar (véase la gráfica 2). Como se observa en la gráfica 1, el rango de índices de acumulación de carbono correspondiente a un solo tipo de vegetación (por ejemplo, *S. patens*) fue tan elevado para un índice dado de aumento en el nivel del mar (de aproximadamente 3 mm/año) como el rango observado en toda la gradiente de índices de aumento del nivel del mar. Estos resultados indican que la elevada variabilidad en la acumulación de carbono se relaciona con mediciones de la duración de las inundaciones más sutiles que las que pueden determinarse con base en el tipo de vegetación, o bien que dicha variabilidad refleja procesos (por ejemplo, nutrientes o clima) que no guardan ninguna relación con las inundaciones y el aumento en el nivel del mar.

Gráfica 1. Índices de acumulación de carbono en marismas de América del Norte sujetas a un rango de índices históricos de aumento relativo en el nivel del mar



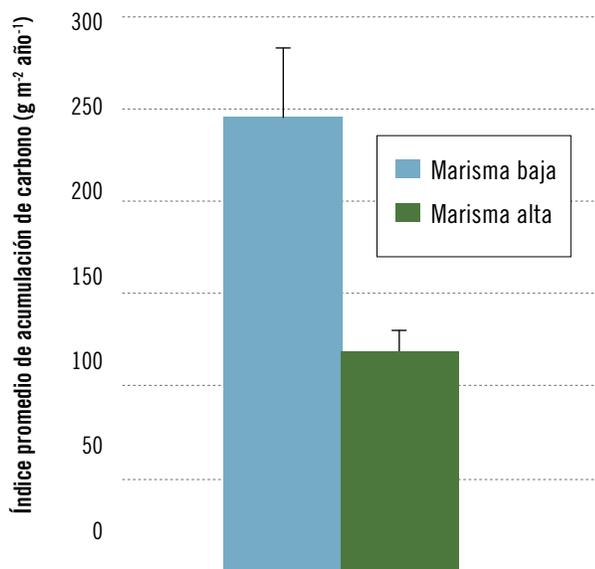
Fuente: Índices de acumulación de carbono obtenidos de Ouyang y Lee (2014). Índices de aumento relativo en el nivel del mar obtenidos de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) de Estados Unidos y el Servicio Permanente de Estudio del Nivel Medio del Mar (Permanent Service for Mean Sea Level, PSMS).



Mapa de marismas en América del Norte para las que se han publicado índices de acumulación de carbono.

Fuente: Imagen de Google Earth ©, con ubicación de puntos de acumulación de carbono a partir de Ouyang y Lee, 2014.

Gráfica 2. Índices promedio de acumulación de carbono para “marismas bajas” con inundaciones frecuentes en comparación con “marismas elevadas” que se inundan con poca frecuencia, donde el tipo de marisma se determinó a partir de la vegetación predominante (marisma baja = *Spartina alterniflora* o *S. foliosa*; marisma elevada = *S. patens*).



Nota: Las barras de error representan el error estándar.

El aumento en el nivel del mar favorece la acumulación de carbono

El presente proyecto constituye el primer intento por vincular índices históricos de captación y almacenamiento de carbono en humedales con el aumento en el nivel del mar. El metaanálisis realizado indica que otros factores distintos del aumento del nivel del mar influyen en los índices de depósito de carbono en el suelo en las marismas de América del Norte. No obstante, tendencias aparentes que vinculan la frecuencia de las inundaciones con el depósito de carbono en el suelo sugieren que la aceleración en los índices de aumento del nivel del mar tenderá a aumentar la importancia del carbono azul en ecosistemas de marismas.

Los resultados de este trabajo llevan a suponer que en el futuro las marismas registrarán índices más elevados de captación y almacenamiento de carbono, por lo cual las acciones encaminadas a protegerlas y restaurarlas cobran aún mayor importancia. Los datos más exhaustivos sobre captación y almacenamiento de carbono en las marismas se obtuvieron para la costa del Atlántico, tanto de Canadá como de Estados Unidos. En contraste, la información de que se dispone para regiones con índices relativamente elevados de aumento en el nivel del mar, como el golfo de México, es bastante limitada. Por ello, las iniciativas futuras habrán de centrarse en el acopio de índices de captación y almacenamiento de carbono en marismas de regiones de la costa del golfo de México donde se observa un rápido aumento en el nivel del mar.



Referencias

Ouyang, X. y S. Y. Lee (2014), “Carbon accumulation rates in salt marsh sediments suggest high carbon storage capacity” [Índices de acumulación de carbono en sedimentos de marismas sugieren una elevada capacidad de almacenamiento de carbono], *Biogeosciences*, núm. 11, pp. 5057-5071.



Carbono azul en marismas septentrionales: evaluación de procesos, reservas e índices de acumulación de carbono en marismas no perturbadas, drenadas y restauradas



cec.org

Estos trabajos ayudarán a establecer prioridades en las iniciativas de conservación, con miras a proteger y maximizar las reservas de carbono en el presente y el futuro.

Investigadores principales:

Gail Chmura (profesora adjunta, Universidad McGill) y **David Burdick** (profesor adjunto de investigación, Universidad de Nuevo Hampshire).



Este proyecto de investigación se llevó a cabo con el apoyo de la Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA) en el marco del proyecto *Carbono azul en América del Norte: evaluación del papel de los hábitats costeros en el balance de carbono del subcontinente* (Plan Operativo 2013-2014).

Destino del carbono de marismas septentrionales

Este proyecto arrojó información nueva sobre reservas regionales de carbono en marismas ubicadas al noreste de América del Norte, con lo cual se expande la cobertura geográfica del subcontinente hasta la latitud de 48°N.

Resumen del proyecto

Esta investigación se basa en estudios de campo intensivos realizados en el verano de 2014 en marismas al noreste de América del Norte, específicamente en el estuario del río San Lorenzo, el golfo de San Lorenzo y el golfo de Maine. A partir de una recolección de más de 3,000 muestras, este trabajo aporta información nueva sobre la variabilidad de la profundidad y la densidad del carbono contenido en turba de marismas, lo que permite evaluar las reservas de carbono y determinar factores e índices de pronóstico de reservas, además de ilustrar una nueva técnica para la medición de índices. El estudio arroja también los primeros datos sobre pérdidas de carbono como resultado de escurrimientos agrícolas en marismas de clima frío (con inviernos gélidos).

Se cartografió la profundidad de la turba en tres marismas —Point Carron, el Parque Nacional de Kouchibouguac y la playa Grants— ubicadas en Nuevo Brunswick, en la costa del golfo de San Lorenzo, así como en una marisma en el golfo de Maine: la Reserva Nacional para la Investigación Estuarina (*National Estuarine Research Reserve*), en Wells, Maine. Dos de las marismas

(Point Carron y playa Grants) se asociaron con cordones o flechas litorales migrantes formadas por bancos de arena y las otras dos (Kouchibouguac y Wells), con lagunas cerradas. En las primeras dos se observaron profundidades de turba que decrecen hacia el extremo del banco de arena, donde puede suponerse que la marisma es de menor antigüedad. Por su parte, las dos marismas situadas en lagunas presentaron turbas más profundas, con el máximo grosor a aproximadamente 500 m tierra adentro desde la orilla de la laguna. Este patrón puede aplicarse a otras marismas en el mismo contexto geomorfológico, aunque amerita investigaciones más a fondo. A pesar de la variabilidad en términos de densidad de carbono, se observó que la profundidad de la turba constituye un importante indicador para el pronóstico de las reservas de carbono en cada marisma. Al combinar datos de todas las marismas, el análisis de regresión muestra que la profundidad de la turba es un importante indicador de futuras reservas de carbono ($r^2 = 0.81$, $p < 0.001$). Un análisis de “vulnerabilidad” u optimización permitió determinar cinco puntos en cada marisma que aportarían el valor más cercano a la reserva de carbono en toda la marisma, calculada a partir del conjunto de todas las muestras posibles al interior de la marisma (en este caso, por ejemplo, de 126 a 11,628). Este análisis prueba que la mejor estrategia de muestreo para marismas en flechas litorales consiste en tomar muestras tanto del extremo de mayor antigüedad como del de menor antigüedad del banco de arena. Un solo transecto puede ser suficiente en una marisma lagunera, aunque se ameritan más investigaciones para determinar el mejor punto del transecto. En términos generales, los resultados sugieren que pueden realizarse estimaciones razonables de las reservas de carbono sin necesidad de un análisis intensivo en cuanto a número de núcleos. La densidad del carbono a 5 cm de la superficie no varía significativamente con la zona de vegetación o la amplitud de



la marea. Sin embargo, los modelos de regresión muestran que la densidad de carbono a 5 cm de la superficie sí guarda una relación importante con las dos variables climáticas estudiadas: la temperatura promedio anual y el número de días-grados de más de 5 °C (medida, esta segunda variable, de la temporada de crecimiento).

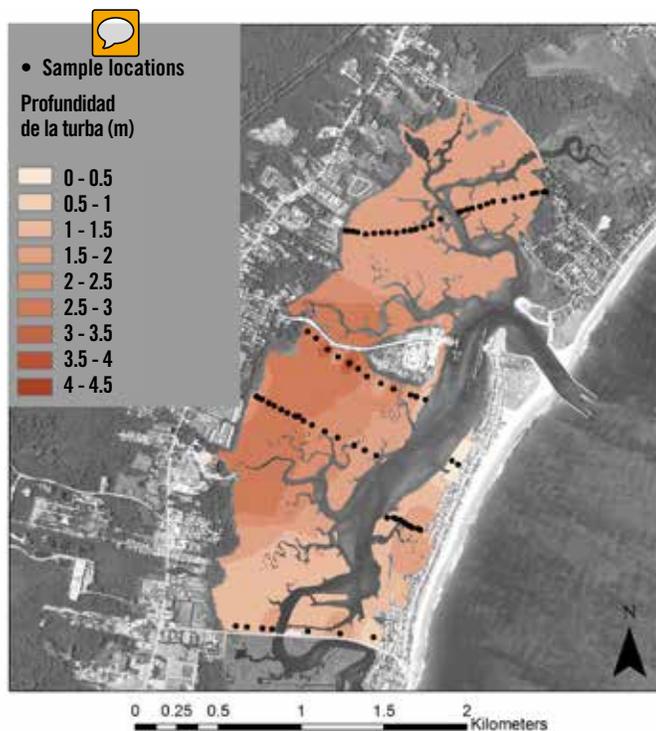
Los índices de acumulación en la turba, determinados mediante perfiles del plomo de origen antropogénico, variaron al interior de las marismas. Se efectuó un análisis de regresión múltiple con los parámetros de elevación superficial y distancias hasta las tierras altas y a bordes de riachuelos o de la marisma, así como las variables nominales de la zona de vegetación y la marisma; sin embargo, no se encontró ningún indicador de importancia para pronosticar índices de acumulación en la turba.

Al evaluar el valor predictivo de los parámetros geomorfológicos antes señalados en la determinación de los índices de acumulación de carbono respecto de los datos combinados de las cuatro marismas, se encontró que únicamente la elevación de la superficie constituye un factor de pronóstico importante ($r^2 = 0.31$, $p < 0.026$). Para tres de las cuatro marismas, la relación que guardan los parámetros geomorfológicos y los índices de acumulación de carbono es mayor cuando los primeros se aplican individualmente a cada marisma (lo que indica diferencias considerables entre una y otra marisma). La elevación de la superficie constituye un factor de pronóstico de enorme relevancia en el sitio de la playa Grants. En el caso de los sitios de Kouchibouguac y Wells, la elevación de la superficie, la distancia hasta las tierras altas y la distancia a bordes de riachuelos o de la marisma constituyen, los tres, elementos importantes para derivar pronósticos.

En marismas alrededor del mundo, los cambios relativos en la elevación de la superficie (sedimentos) se suelen medir utilizando estratos de marcación y dispositivos SET (del inglés: *Surface Elevation Tables*). En Wells, los índices de acumulación en la turba medidos con un dispositivo SET (50-92 g C m⁻²año⁻¹) resultaron comparables a los índices determinados mediante el análisis de plomo 210. Los análisis del carbono contenido en la turba por arriba y abajo de los estratos de marcación demuestran que la combinación de estas mediciones, junto con el uso del método SET y la determinación de la profundidad mediante estratos de marcación, representa una técnica conveniente y económica para determinar índices de acumulación de carbono.

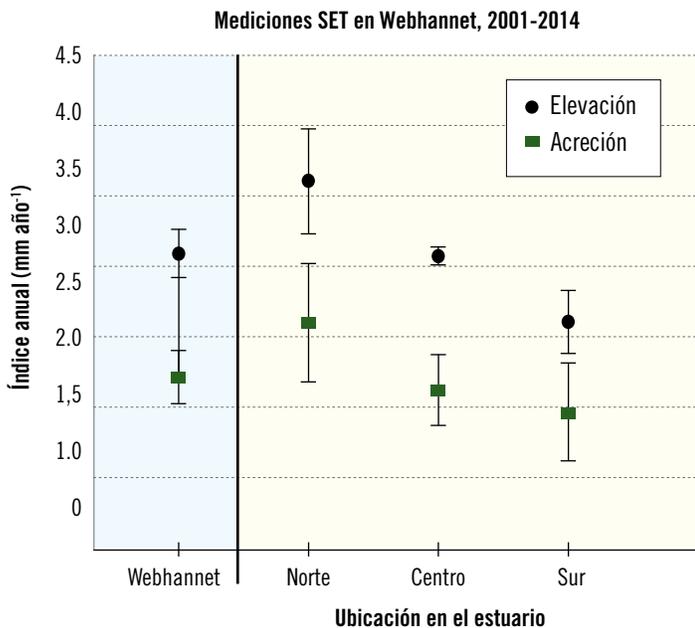
En el sitio más meridional —marisma Webhannet en Wells, Maine—, los resultados obtenidos mediante el dispositivo SET sugieren que el aumento en el nivel del mar está favoreciendo la acumulación de carbono con el tiempo. De acuerdo con la modelización realizada, este fenómeno continuará de mantenerse los índices actuales de aumento en el nivel del mar, pero si el nivel del mar aumenta con mayor rapidez, entonces supondrá una amenaza para las reservas de carbono. En este sitio, la acreción y el crecimiento de la elevación subsuperficial de la turba se calcularon utilizando el método SET y estratos marcadores. La acreción sedimentaria (sedimentos depositados por encima de los estratos marcadores) registró un promedio

Gráfica 1. Mapa isópaco de la turba en la marisma Webhannet, en la Reserva Nacional para la Investigación Estuarina Wells, Maine, Estados Unidos



Nota: Los puntos negros representan la ubicación de los núcleos o sondas.

Gráfica 2. Cambios en la elevación de la superficie y acreción sedimentaria superficial en la marisma Webhannet (Wells)



de 2.2 mm año⁻¹ en los últimos 13 años. La elevación real de la marisma aumentó en promedio 3.1 mm año⁻¹, lo que indica que la turba se acumuló con un índice de cerca de 0.9 mm año⁻¹ por abajo de los estratos marcadores (véase la gráfica 2). Datos adicionales sobre la densidad de carbono ofrecen una estimación de los índices anuales de almacenamiento de carbono para la marisma.

Por otra parte, se han observado pérdidas de carbono en humedales intermareales ocasionadas por escurrimientos agrícolas en California, Australia e Italia; sin embargo, el presente estudio es el primero en realizar mediciones para marismas drenadas en la zona del Atlántico en Canadá, donde se registra un régimen climático distinto y la “recuperación” de humedales con fines de conversión a tierras agrícolas ha sido un fenómeno extendido. Se compararon las reservas de carbono de marismas drenadas e inundadas en el estuario del río San Lorenzo con el propósito de determinar las pérdidas, mismas que variaron de 8.6 a 18.5 kg m⁻², es decir, entre 18 y 39 por ciento de las reservas de carbono originales. Estos resultados indican que un modelo elaborado anteriormente había sobrestimado las pérdidas, pero para completar la calibración de este modelo se requerirá investigaciones ulteriores. Cabe subrayar que este índice de pérdida es mayor que el índice de acumulación de carbono en la marisma de Wells, lo que destaca que la restauración de marismas drenadas en el río San Lorenzo debe constituir una prioridad de conservación.

Las mediciones de la profundidad de la turba (véase la gráfica 1) mostraron una variabilidad considerable al interior de cada marisma y entre las marismas estudiadas. No obstante, las directrices del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) para calcular emisiones de gases de efecto invernadero emanadas de humedales costeros (Kennedy *et al.*, 2014) aportan valores por defecto de un metro de profundidad para suelos de humedales costeros y una densidad de carbono de 0.034 y 0.02 g cm⁻³ para suelos orgánicos y minerales, respectivamente. (La superficie de una marisma

multiplicada por la profundidad del suelo o la turba proporcionará el volumen de la turba. Al multiplicar este volumen por la densidad de carbono se obtendrá el valor correspondiente a la reserva.) Directrices similares se incorporan en protocolos que permiten calcular las reservas para aplicación en el contexto de los mercados de carbono. Ahora bien, los resultados preliminares del presente estudio sobre marismas septentrionales aportan ya pruebas contundentes de que los cálculos de reservas de carbono en los que se presupone una profundidad de un metro dan lugar a sobrestimaciones de las reservas de carbono en algunas marismas, por ejemplo, la playa Grant, y subestimaciones en otras, como la de Wells. Por ello, considerar las reservas de carbono en marismas con base únicamente en la superficie podría resultar engañoso, y la jerarquización de humedales para su protección o gestión con base en las reservas de carbono requerirá que se realicen mediciones por sitio.

Evaluación del papel de los humedales intermareales en los balances de carbono mundiales

Difícilmente podrá determinarse con precisión el papel de los humedales intermareales en los balances de carbono mundiales en tanto no se disponga de más información sobre las reservas de carbono en estos ecosistemas y su evolución cronológica. Aún no se sabe con claridad qué variables revisten la mayor relevancia para determinar la variabilidad de las reservas de carbono entre una y otra marisma: el contexto geomorfológico, la edad o el clima contribuyen a esta variabilidad. Por ello es preciso tomar en cuenta un mayor número de contextos geomorfológicos (por ejemplo, marismas fluviales); asimismo, deberán examinarse marismas en un rango aún mayor de latitudes (lo mismo septentrionales que meridionales).

En numerosas marismas intermareales y manglares de América del Norte se utilizan estratos de marcación y dispositivos SET para la medición de la elevación superficial, y sus resultados podrían utilizarse para realizar comparaciones de los índices actuales de acumulación de carbono a escala subcontinental.

Referencias

Kennedy, H. A., D. M. Alongi, A. Karim, G. Chen, G. L. Chmura, S. Crooks, J. G. Kairo, B. Liao y G. Lin (2014), “Chapter 4, Coastal Wetlands” [Capítulo 4: Humedales costeros], *Suplemento de las Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero: humedales* (en inglés), en: <www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/wetlands/>.

