

ARTÍCULO ORIGINAL

Inventarios y tasas de acumulación de carbono orgánico en sedimentos de praderas marinas en el Golfo de Batabanó, Cuba

Inventories and rates of organic carbon accumulation in seagrass bed sediments in the Gulf of Batabano, Cuba

Carlos Alonso-Hernandez^{1*}
Misael Díaz-Asencio^{2,5}
Beatriz Martínez-Daranas³
Yasser Morera-Gómez⁴
Yusmila Helguera Pedraza⁵

¹IAEA Marine Environment
Laboratories 4 Quai Antoine 1er,
MC-98000 Monaco, Principality of
Monaco.

²Escuela Nacional de Estudios
Superiores Unidad Mérida. Tablaje
Catastral N°6998, Carretera
Mérida-Tetiz Km. 4.5, Municipio de
Ucú, Yucatán, México, C.P. 97357.

³Centro de Investigaciones Marinas.
Calle 16 No. 114, Playa, La Habana
11300, Cuba.

⁴Universidad de Navarra, Instituto de
Biodiversidad y Medioambiente
BIOMA, Irunlarrea 1, 31008,
Pamplona, España.

⁵Centro de Estudios Ambientales de
Cienfuegos. AP 5, Ciudad Nuclear,
59350, Cienfuegos, Cuba.

Autor para la correspondencia:
c.m.alonso-hernandez@iaea.org

OPEN ACCESS

Distribuido por:
Creative Commons Atribución-
NoComercial 4.0 Internacional
(CC BY-NC 4.0)

Editor:
Ana María Suárez
(CIM-UH)

Recibido: 05.08.2024
Aceptado: 12.03.2025

Resumen

Las praderas de pastos marinos son reconocidos sumideros de carbono orgánico (Corg) con un papel crucial en la mitigación del cambio climático. Sin embargo, la información cuantitativa sobre sus reservas y tasas de acumulación de Corg es limitada en el Caribe insular, una región de alta vulnerabilidad climática. Cuba, que alberga hasta el 18 % de la superficie global documentada de praderas marinas tropicales, presenta una importancia estratégica en el contexto del carbono azul. Para abordar la escasez de datos locales, esta investigación caracterizó las concentraciones de Corg en perfiles de sedimentos recolectados en la zona de pastos marinos del Golfo de Batabanó, Cuba, mediante el análisis geoquímico de núcleos de sedimento. Los resultados revelaron concentraciones de Corg promedio (\pm DE) de 2.94 ± 1.01 % (rango 1.67 a 4.83 %). Los análisis isotópicos indican que el 65 % del Corg es de origen autóctono, subrayando la eficiencia del ecosistema en el secuestro de carbono. El primer metro de sedimento en el área de estudio almacena entre 110 y 260 Mg Corg ha⁻¹ y sus tasas de acumulación anual alcanzan un promedio de 26.5 ± 13.3 g Corg m⁻² año⁻¹. A partir del área cubierta por praderas marinas en el Golfo de Batabanó, se estima que estos ecosistemas secuestran y acumulan anualmente 1.03 millones de toneladas de CO₂, lo que representa el 4.3 % de las emisiones anuales de CO₂ de Cuba. Si bien esta extrapolación ofrece una perspectiva del potencial a nivel nacional, al proyectar estos resultados a la superficie total de pastos marinos estimada para la plataforma cubana (29 250 km²), se sugiere que estos ecosistemas podrían absorber hasta un 20 % de las emisiones anuales de CO₂ del país. Estos hallazgos confirman el rol estratégico de los pastos marinos cubanos en la mitigación del cambio climático y refuerzan la urgencia de integrarlos de manera efectiva en estrategias de conservación, restauración y manejo costero integrado a nivel nacional.

Palabras clave: carbono azul, pastos marinos, isótopos del carbono, Cuba, Caribe.

Abstract

Seagrass meadows are highly efficient sinks of organic carbon (Corg), playing a crucial role in climate change mitigation through the accumulation and storage of carbon in their sediments. However, quantitative information on the reserves and accumulation rates of Corg in the sediments of these ecosystems is limited in various regions, including the insular Caribbean. Notably, Cuba possesses up to 18 % of the documented global area of tropical seagrass meadows, highlighting its strategic importance in the context of blue carbon. The scarcity of local data hinders the adequate formulation of conservation and restoration policies to maximize the climate mitigation potential of these coastal plant ecosystems. In this research, Corg concentrations were characterized in sediment profiles collected in the seagrass area of the Gulf of Batabano, Cuba, through the geochemical analysis of sediment cores. The results revealed average (\pm SD) Corg concentrations of 2.94 ± 1.01 % (range 1.67 to 4.83 %), with isotopic analysis indicating that 65 % of the Corg is of autochthonous origin, underscoring the efficiency of the ecosystem in carbon sequestration. The first meter of sediment in the study area stores between 110 and 260 Mg Corg ha⁻¹, and its average annual accumulation rates reach 26.5 ± 13.3 g Corg m⁻² year⁻¹. Based on the area covered by seagrass meadows in the Gulf of Batabano, it is estimated that these ecosystems sequester and accumulate annually 1.03 million tons of CO₂, representing 4.3 % of Cuba's annual CO₂ emissions. While this extrapolation offers a perspective on the national-level potential, projecting these results to the total estimated seagrass area for the Cuban shelf (29,250 km²) suggests that these ecosystems could absorb up to 20 % of the country's annual CO₂ emissions. These findings confirm the strategic role of Cuban seagrass meadows in climate change mitigation and reinforce the urgency of effectively integrating them into national conservation, restoration, and integrated coastal management strategies.

Keywords: blue carbon, seagrasses, carbon isotopes, Cuba, Caribbean.

Introducción

Las praderas de pastos marinos, a pesar de cubrir menos del 0.1 % (entre 160 387 y 266 562 km², (McKenzie *et al.*, 2020) de la superficie marina global, se distinguen como ecosistemas de alto valor intrínseco, en tanto proporcionan servicios esenciales como el reciclaje de nutrientes, refugio y alimento para la biodiversidad, protección costera y un papel crucial en la mitigación y adaptación al cambio climático (Dewsbury *et al.*, 2016). A escala global, se estima que estas praderas almacenan en promedio 77 Mg de carbono orgánico por hectárea en el primer metro de sedimento (Kennedy *et al.*, 2022) y pueden capturar Corg hasta 40 veces más eficientemente que los suelos de bosques terrestres, resaltando su importancia en la mitigación del cambio climático a escalas temporales centenarias y milenarias (Duarte *et al.*, 2013).

El creciente reconocimiento del papel de los pastos marinos como importantes sumideros de carbono ha impulsado esfuerzos para cuantificar las magnitudes de las tasas de acumulación y las fuentes de Corg en sus sedimentos a diferentes escalas. Estas cuantificaciones son esenciales para respaldar iniciativas de conservación, restauración y compensación de emisiones bajo marcos como REDD+ o los compromisos del Acuerdo de París. A pesar de que estas estimaciones han generado información valiosa sobre los inventarios y tasas de acumulación de Corg en estos ecosistemas, se observa un sesgo geográfico en los datos disponibles, lo que genera lagunas significativas de información, especialmente para el Caribe y los países de América Central y África, que aún están poco representados en las bases de datos globales (Bedulli *et al.*, 2020). Esta falta de datos limita la capacidad de desarrollar políticas climáticas basadas en evidencia en estos contextos regionales.

Las estimaciones nacionales y regionales de los inventarios y tasas de acumulación de Corg en los sedimentos de praderas de pastos marinos resultan cruciales, ya que pueden variar considerablemente entre hábitats

dependiendo de diversos factores biogeoquímicos y físicos interrelacionados, como las características estructurales de los pastos marinos, la hidrodinámica, la mineralogía y granulometría del sedimento (Kennedy *et al.*, 2022) y la influencia de fuentes externas de materia orgánica (Serrano *et al.*, 2021).

En el contexto del Caribe, Shayka *et al.* (2023) estimaron que los 88 170 km² de praderas de pastos marinos almacenan alrededor de 1 338 Tg de Corg (con estimaciones mínimas y máximas de 360 a 2 335 Tg de Corg). Además, se calculó que el valor económico total de los servicios ecosistémicos proporcionados por estos hábitats asciende a \$255 mil millones de USD al año, de los cuales \$88.3 mil millones se atribuyen directamente a la acumulación de carbono. Estas cifras subrayan la relevancia ecológica y la potencial contribución económica de las praderas de pastos marinos para la región.

En el caso de Cuba, Schill *et al.* (2021) estimaron que el país posee alrededor de 29 250 km² de pastos marinos (33 % del área del Caribe, lo que representa entre el 11 y el 18 % del área global documentada según McKenzie *et al.*, 2020), cifra que presenta incertidumbre debido a las limitaciones en la cartografía bentónica de la plataforma cubana (casi 54 000 km² según Martínez-Daranas y Suárez, (2018), posiblemente derivadas de diferencias metodológicas. Dentro del contexto nacional, el Golfo de Batabanó (GB) constituye el principal ecosistema de pastos marinos en Cuba, con un estimado entre 10 648 km² (Almeida Martínez *et al.*, 2025) y 13 818 km² (Cerdeira-Estrada *et al.*, 2008). Este extenso ecosistema representa entre un 4 y 8 % del total del área de pastos marinos a nivel global, convirtiéndolo en una prioridad para la conservación y protección no solo a nivel nacional sino mundial, dada su significativa extensión y potencial biodiversidad. A pesar de su relevancia ecológica, hasta la fecha no se cuenta con datos científicos publicados sobre inventarios ni tasas de almacenamiento de Corg en los sedimentos de estas praderas (Martínez-Daranas y Suárez, 2018), lo

que subraya una importante laguna de conocimiento específica para este ecosistema clave.

Esta investigación tiene como propósito generar una línea base científica sobre el Corg en los sedimentos de las praderas marinas del Golfo de Batabanó. En particular, se estiman las concentraciones, los inventarios y las tasas anuales de acumulación de Corg y se identifican las principales fuentes de Corg en los sedimentos, utilizando herramientas isotópicas y geoquímicas. Los resultados permitirán comprender mejor el potencial de almacenamiento de carbono azul en este ecosistema de importancia global, así como su relevancia para la mitigación del cambio climático en Cuba.

Materiales y Métodos

Área de Estudio

El Golfo de Batabanó, ubicado en la región suroccidental de Cuba (21°25' a 22°41'N y 80°52' a 84°00'O), es un cuerpo de agua semicerrado de aproximadamente 21 305 km² y 6 m de profundidad media (Cerdeira-Estrada *et al.*, 2008). Este extenso sistema alberga diversos hábitats bentónicos, en los que predominan los fondos blandos compuestos principalmente por lodos finos y arenas finas, con una cobertura significativa de praderas de la angiosperma marina *Thalassia testudinum* (Martínez-Daranas & Suárez, 2018). Otras macroalgas relevantes incluyen géneros de Bryopsidales como *Halimeda*, *Penicillus* y *Caulerpa* (Arias-Schreiber *et al.*, 2008). La cartografía más reciente (Almeida Martínez *et al.*, 2025) indica que las praderas de pastos marinos cubren aproximadamente 10 648 km² del golfo. Los sedimentos del golfo se caracterizan por un alto contenido de carbonato de calcio (promedio 77.5 %) y un contenido de carbono orgánico que varía entre 0.29 y 12.4 % (Alonso-Hernandez *et al.*, 2011), con una mayor retención de materia orgánica en las fracciones sedimentarias más finas. Las tasas de acumulación másica en el golfo oscilan entre 0.05 y 0.57 g/cm²/año (Díaz-Asencio *et al.*, 2016).

Muestreo y Pretratamiento de Sedimentos

Para este estudio, se seleccionaron cinco perfiles de sedimentos previamente recolectados (Díaz-Asencio *et al.*, 2016) de áreas del Golfo de Batabanó caracterizadas por la presencia de praderas de *T. testudinum* (tabla 1). Estos sitios fueron elegidos estratégicamente para representar condiciones típicas de las praderas del golfo y por la disponibilidad de datos previos de tasas de sedimentación. Los perfiles se seccionaron verticalmente en intervalos contiguos de 1 cm hasta alcanzar profundidades de entre 30 y 50 cm.

Para asegurar una representación exhaustiva del Corg asociado a las praderas marinas, se consideró

tanto la biomasa viva como muerta presente en el sedimento. Cada sección de sedimento fue liofilizada (Labconco FreeZone 2.5) hasta peso constante y posteriormente homogeneizada mediante molienda fina con un mortero de ágata, seguida de tamizado a través de una malla de 250 μm .

Determinación de Corg, NT y $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$

Las determinaciones de Corg, NT y $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ fueron realizadas siguiendo el procedimiento utilizado por Alonso-Hernandez *et al.* (2020). Submuestras de sedimentos homogeneizados y tamizados se acidificaron con una solución de HCl al 12 % para eliminar los carbonatos

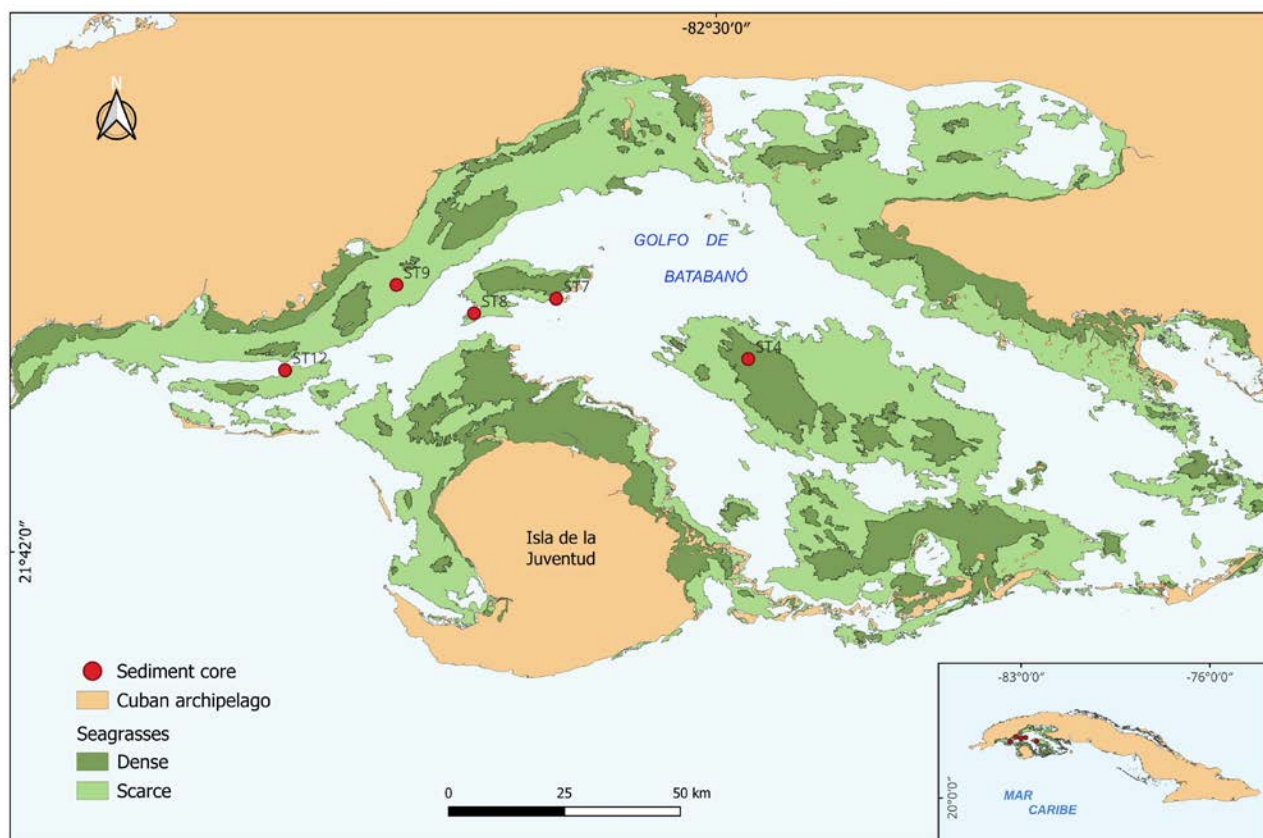


Fig. 1. Ubicación de las estaciones de muestreo de los perfiles sedimentarios en el Golfo de Batabanó, Cuba. Los puntos negros indican las estaciones analizadas en este estudio (ST4, ST7, ST8, ST9 y ST12). En verde se representa la distribución estimada de praderas marinas según Almeida Martínez *et al.* (2025), basada en imágenes satelitales LandSat OLI 8, Sentinel 2A, Bing Satélite y datos de batimetría costera.

Fig. 1. Location of the sampling stations for sediment profiles in the Gulf of Batabano, Cuba. Black dots indicate the stations analyzed in this study (ST4, ST7, ST8, ST9, and ST12). The estimated distribution of seagrass meadows, according to Almeida Martínez *et al.* (2025), is shown in green, based on LandSat OLI 8, Sentinel 2A, Bing Satellite imagery, and coastal bathymetric data.

inorgánicos y posteriormente determinar el contenido de Corg y el correspondiente $\delta^{13}\text{C}_{\text{Corg}}$. El tratamiento ácido se repitió tres o cuatro veces para asegurar la eliminación completa de los carbonatos, y luego las muestras se secaron en un horno a 50 °C durante 24 horas. El contenido de NT se realizó en submuestras sin acidificación.

El contenido de NT, Corg y su correspondiente composición isotópica estable ($\delta^{13}\text{C}_{\text{Corg}}$) se determinaron utilizando un analizador elemental (Vario MICRO Cube, Elementar, Hanau, Alemania) acoplado a un espectrómetro de masas de relación isotópica (IsoPrime 100, Cheadle, Reino Unido) operando en modo de flujo continuo. La calibración del instrumento se realizó utilizando ácido sulfanílico y los materiales de referencia IAEA-N-1 y USGS 40. El control de calidad analítico se llevó a cabo mediante el análisis rutinario de estándares isotópicos internacionales de carbono (IAEA, Viena, Austria). La exactitud fue de 7.0 y 8.0 % para Corg y NT, respectivamente, mientras que fue de $\pm 0.15\text{‰}$ para $\delta^{13}\text{C}$ y $\pm 0.30\text{‰}$ para $\delta^{15}\text{N}$. También se analizaron varias muestras por duplicado para estimar la precisión de los análisis. La reproducibilidad obtenida fue de 1.1 y 1.3 % para la determinación de Corg y NT, respectivamente; y fue de 0.08‰ para $\delta^{13}\text{C}_{\text{Corg}}$.

Identificación de las Fuentes de Corg

Para identificar las fuentes de Corg en los sedimentos, se analizaron las señales isotópicas de $\delta^{13}\text{C}_{\text{Corg}}$ y las relaciones Corg/TN en submuestras tomadas a diferentes profundidades de cada perfil. Se aplicó el esquema de identificación de fuentes propuesto por Meyers (1994), comparando los valores obtenidos con los rangos característicos de diferentes fuentes potenciales (fitoplankton, material terrestre, macroalgas y pastos marinos) reportados en la literatura (Lamb *et al.*, 2006; Meyers, 1997; Yun *et al.*, 2020) y en estudios previos en ecosistemas cubanos (Alonso-Hernandez *et al.*, 2020, 2017). La contribución relativa de cuatro fuentes potenciales de Corg se cuantificó utilizando un modelo de mezcla

bayesiana (paquete MixSIAR en R versión 4.3.0). Las fuentes consideradas fueron: materia orgánica particulada (MOP) de la columna de agua cercana a las praderas ($\delta^{13}\text{C} = -22.16\text{‰} \pm 1.63$, Alonso-Hernández *et al.*, 2017), manglares (*Rhizophora mangle*, $\delta^{13}\text{C} = -27.95\text{‰} \pm 1.14$), pastos marinos (*Thalassia testudinum*, $\delta^{13}\text{C} = -7.98 \pm 2.19$) y macroalgas bentónicas (principalmente *Halimeda incrassata* y *Caulerpa prolifera*, $\delta^{13}\text{C} = -17.06 \pm 0.32$). Los valores de $\delta^{13}\text{C}$ para manglares, pastos marinos y macroalgas se obtuvieron de análisis isotópicos realizados en tejidos representativos (hojas maduras) de cinco individuos por especie recolectados en el área de estudio, cuyos datos detallados serán presentados en una publicación posterior. La selección de estas fuentes se basó en su presencia y potencial aporte de biomasa al sistema del Golfo de Batabanó.

Análisis Estadísticos e Inventarios de Corg

Se evaluaron las diferencias en los perfiles de Corg y $\delta^{13}\text{C}$ entre las cinco estaciones utilizando una prueba ANOVA no paramétrica de Kruskal-Wallis, seguida de una prueba *post hoc* de Dunn para identificar diferencias específicas entre pares de estaciones (software OriginPro 2023). La elección de pruebas no paramétricas se basó en la falta de normalidad de los datos (prueba de Shapiro-Wilk). Se utilizaron tablas de contingencia para analizar la asociación entre las estaciones y la significancia estadística de las diferencias (nivel de significación $\alpha = 0.05$).

Los inventarios de carbono orgánico se calcularon para cada perfil hasta la profundidad muestreada, utilizando la densidad seca del sedimento determinada para cada sección. Para facilitar la comparación con estudios previos, se proyectó el inventario hasta 1 metro de profundidad aplicando un factor de corrección (100/profundidad del perfil en cm), siguiendo la metodología de (Howard *et al.*, 2014). Los resultados se presentan como inventarios de Corg proyectados al primer metro de sedimento. La visualización de los datos se realizó con OriginPro 2023.

Tasas de Acumulación de Corg

Las tasas de acumulación de Corg ($\text{g Corg m}^{-2} \text{ año}^{-1}$) se calcularon multiplicando la tasa de acumulación mássica ($\text{g m}^{-2} \text{ año}^{-1}$) específica para cada sitio (obtenida de Díaz-Asencio *et al.*, 2016) por la concentración promedio de Corg (fracción decimal) en el primer metro de sedimento de cada perfil.

Resultados y discusión

Carbono orgánico y sus fuentes en los sedimentos

El contenido de Corg en las muestras de sedimentos analizadas para el área de estudio tuvo un promedio (\pm DE) de 2.94 ± 1.01 % (rango 1.67 a 4.83 %) (Fig. 2). La prueba ANOVA no paramétrica de Kruskal-Wallis arrojó diferencias significativas entre las estaciones, con un nivel de significancia de $p < 0.05$. Dos

grupos de asociaciones fueron obtenidas del análisis *post hoc* con la prueba de Dunn ($p < 0.05$). Las estaciones ST4 (1.95 ± 0.14 %), ST7 (1.71 ± 0.05 %) y ST8 (2.31 ± 0.17 %) no mostraron diferencias significativas entre ellas, conformando una primera asociación, mientras que resultaron significativamente diferentes de las estaciones ST9 (4.30 ± 0.68 %) y ST12 (3.61 ± 0.35 %), que conformaron la segunda asociación observada.

Los valores de Corg obtenidos son consistentes con los reportados previamente (0.29-12.4 %) para sedimentos superficiales del Golfo de Batabanó (Alonso-Hernandez *et al.*, 2011; Díaz-Asencio *et al.*, 2016) y otras zonas costeras de Cuba como el Refugio de Fauna Laguna de Guanaroca (1.72–3.03 %, Alonso-Hernandez *et al.*, 2017) y la bahía de Santa Clara (1.25–1.75 %, Alonso-Hernandez *et al.*, 2020).

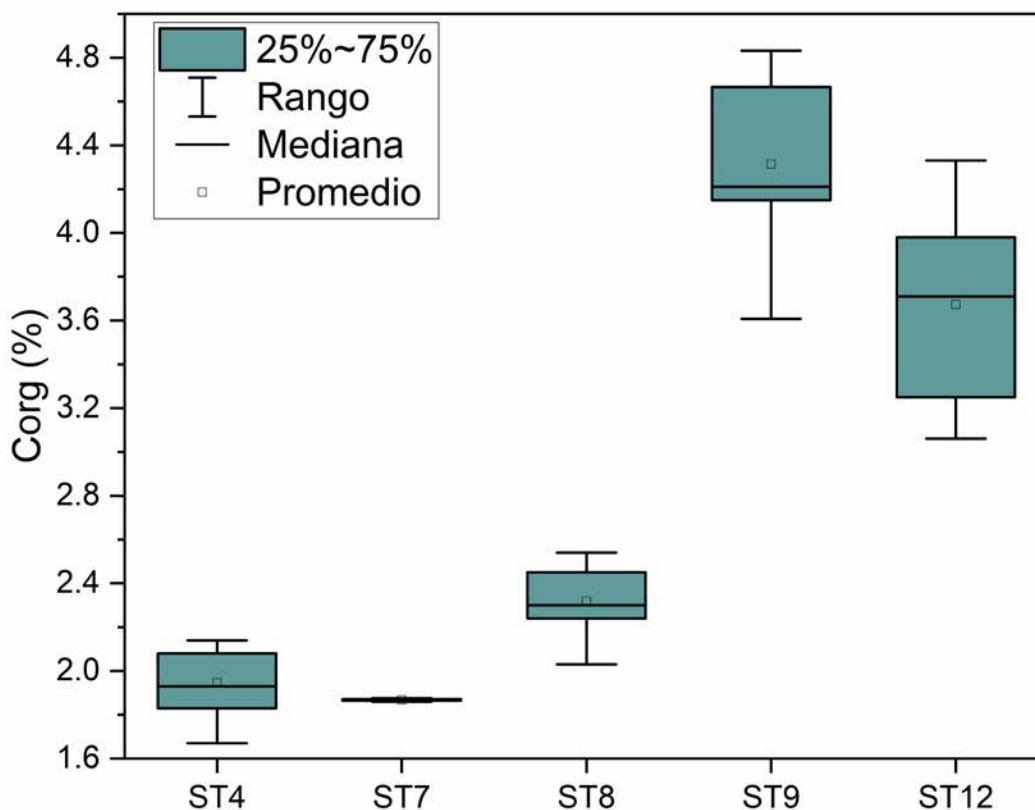


Fig. 2. Valores de Corg (%) en los sedimentos de las estaciones analizadas en el Golfo de Batabanó, Cuba.

Fig. 2. Corg (%) values in the sediments of the analyzed stations in the Gulf of Batabano, Cuba

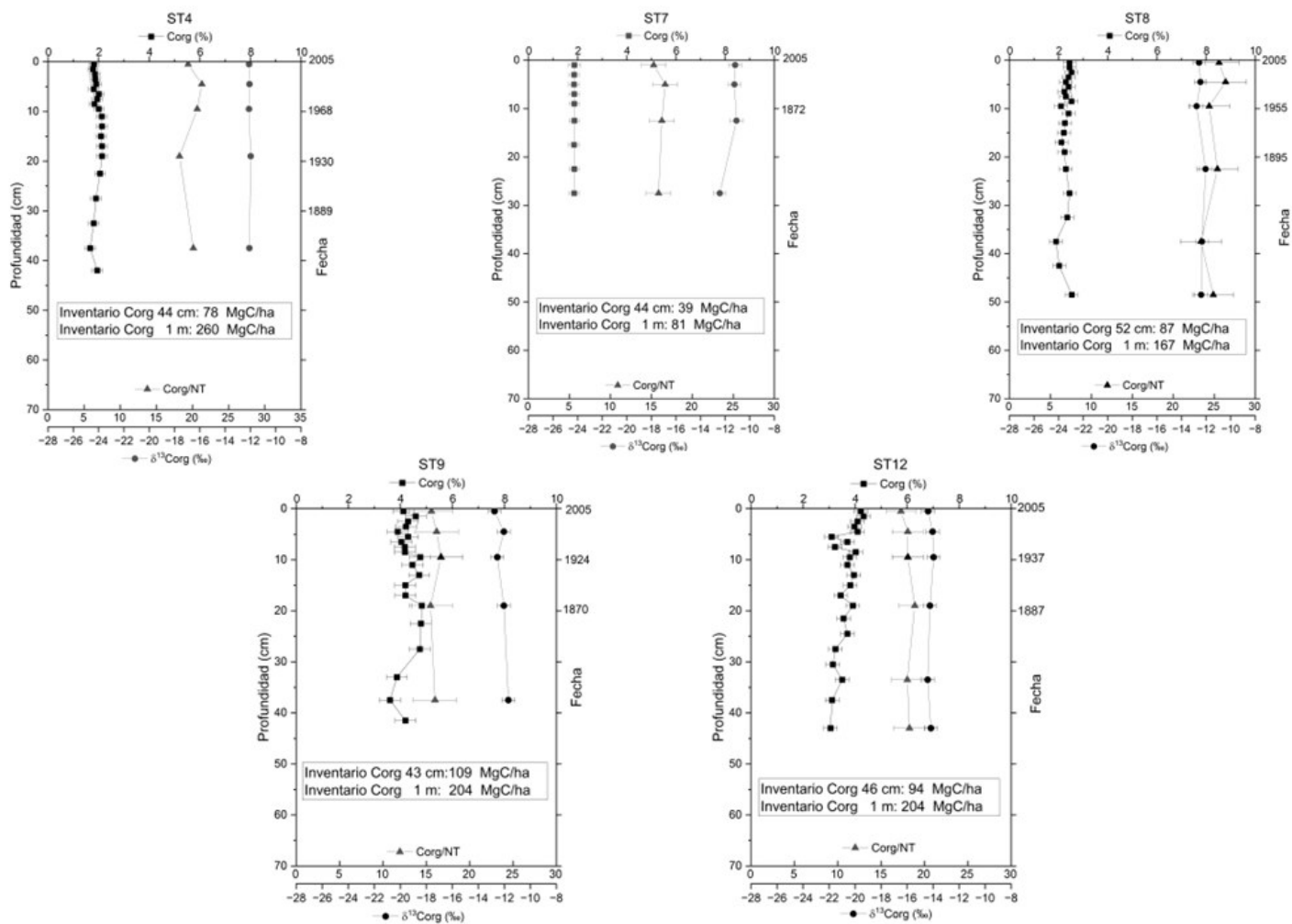


Fig. 3. Distribución vertical del carbono orgánico (Corg), de la señal isotópica de carbono ($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$) y de la relación Corg/NT en perfiles de sedimentos del Golfo de Batabanó, Cuba.

Fig. 3. Vertical distribution of organic carbon (Corg), carbon isotopic signal ($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$), and Corg/NT ratio in sediment profiles from the Gulf of Batabano, Cuba.

La distribución vertical de los contenidos de Corg en las estaciones estudiadas mostró un patrón constante de concentraciones en todos los perfiles analizados (Fig. 3). La densidad aparente seca a lo largo de los perfiles sedimentarios fue de $0.631 \pm 0.182 \text{ g cm}^{-3}$ de media (rango: $0.293\text{--}1.18 \text{ g cm}^{-3}$), sin observarse diferencias significativas entre las distintas estaciones ($p < 0.05$).

En comparación con los resultados reportados por Fu *et al.* (2023) para praderas marinas en las Bahamas,

donde se documentó un contenido promedio de Corg de $0.74 \pm 0.21 \%$, los valores obtenidos en este estudio resultan considerablemente más altos. Esta diferencia sugiere una mayor acumulación y preservación de carbono en los sedimentos del Golfo de Batabanó. Asimismo, la densidad aparente de los sedimentos en nuestro estudio fue menor ($0.631 \pm 0.182 \text{ g cm}^{-3}$) que la reportada por Fu *et al.* ($0.9 \pm 0.3 \text{ g cm}^{-3}$), lo cual es coherente con un mayor contenido de Corg y una menor compactación del sedimento. La distribución vertical estable del Corg

observada en ambos estudios (Fig. 3) respalda la hipótesis de condiciones ambientales relativamente constantes a lo largo del tiempo, así como una fuente sostenida de Corg que se acumula de forma continua en el sistema bentónico.

Los sedimentos analizados presentaron un valor promedio (\pm DE) de $\delta^{13}\text{C}_{\text{Corg}}$ de -12.57 ± 1.01 ‰ y una relación molar carbono orgánico-nitrógeno (Corg/TN) de 19.3 ± 3.53 (Fig. 3). Tanto los valores de $\delta^{13}\text{C}_{\text{Corg}}$ como las relaciones Corg/TN fueron similares entre las distintas estaciones estudiadas y mostraron un patrón constante con la profundidad (Fig. 3). Esta escasa variabilidad temporal, en función de las tasas de acumulación, sugiere un aporte relativamente estable de Corg a

los sedimentos, así como una constancia en los procesos biogeoquímicos que regulan su transformación y preservación en el fondo. Además, podría indicar una baja variabilidad en las condiciones ambientales del entorno sedimentario a lo largo del tiempo.

A partir del esquema adoptado para la identificación preliminar de las fuentes de materia orgánica propuesto por Meyers (1994), nuestros resultados mostraron que los valores de $\delta^{13}\text{C}_{\text{Corg}}$ y las relaciones Corg/TN son indicativos de un origen predominantemente autóctono, asociado a plantas C_4 , y específicamente reflejan la señal isotópica característica de los pastos marinos presentes en el Golfo de Batabanó (Fig. 4). Los valores de $\delta^{13}\text{C}_{\text{Corg}}$ (-12.57 ± 1.01 ‰)

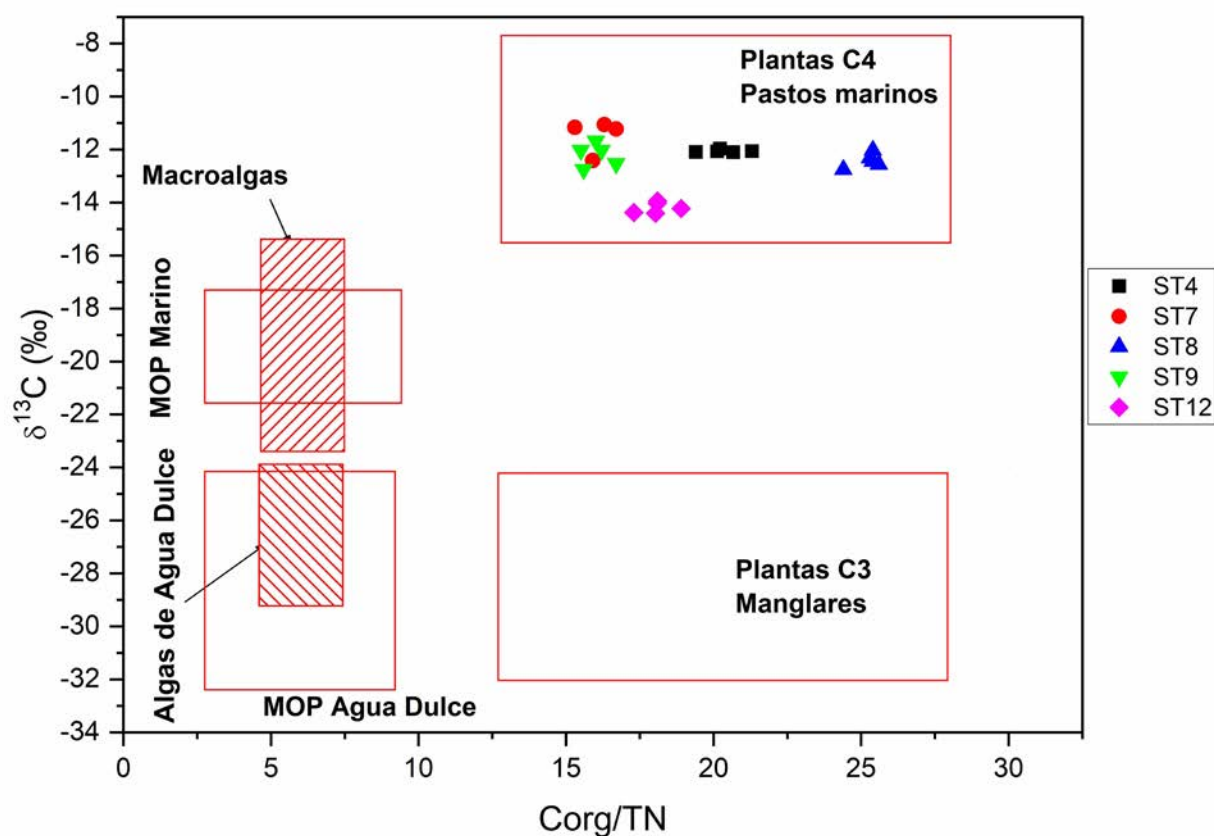


Fig. 4. Diagrama de identificación potencial de las fuentes de materia orgánica para el Golfo de Batabanó utilizando valores de $\delta^{13}\text{C}_{\text{Corg}}$ y relaciones Corg/TN en muestras de sedimentos. MOP = Materia orgánica particulada.

Fig. 4. Potential source identification diagram of organic matter for the Gulf of Batabanó using $\delta^{13}\text{C}_{\text{Corg}}$ values and Corg/TN ratios in sediment samples. POM = particulate organic matter.

Tabla 1. Caracterización de las estaciones de colecta de perfiles sedimentarios en el Golfo de Batabanó.
Table 1. Characterization of the sedimentation stations in the Gulf of Batabano.

Estación	Localización	Longitud del perfil sedimentario (cm)	Profundidad de la columna de agua (m)	Salinidad (‰)	Características del sitio
ST4	22°06.000N 82°25.980W	42	5	34	Arenoso, Pastos Marinos
ST7	22°12.450N 82°48.646W	46	5	35	Arenoso, Pastos Marinos
ST8	22°11.969N 82°01.806W	49	7	34	Arenoso, Pastos Marinos
ST9	22°15.299N 82°10.134W	29	8	34	Fangoso, escasa vegetación
ST12	22°04.593N 83°24.023W	29	12	34	Limos, olor a sulfuro

son comparables a los reportados a nivel global para zonas dominadas por *Thalassia testudinum*, como el caso de las praderas densas de las Bahamas donde se registró un valor de $\delta^{13}\text{C}_{\text{Corg}}$ de -12.5 ± 0.9 ‰ (Fu *et al.*, 2023).

La relación Corg/TN encontrada (19.3 ± 3.53) es considerablemente más alta que los promedios globales reportados por Fu *et al.* (2023), quienes documentaron un valor medio de 11.1 ± 2.8 en praderas marinas dominadas también por *Thalassia testudinum*. Esta diferencia podría atribuirse, en parte, a una mayor proporción de materia vegetal estructural en nuestros sedimentos, principalmente asociada a raíces, rizomas y detritos de pastos marinos en estado poco degradado. Este tipo de material se caracteriza por su alto contenido de carbono estructural y bajo contenido de nitrógeno, lo cual se traduce en relaciones Corg/TN elevadas. Otra posible explicación radica en las diferencias metodológicas en la preparación de las muestras entre estudios. La inclusión o exclusión de material vegetal grueso, como raíces vivas o muertas, puede influir significativamente en las estimaciones de carbono y las relaciones Corg/TN, afectando la comparabilidad de los resultados. En nuestro caso, se adoptó un enfoque integral, considerando que todo el contenido orgánico presente en las secciones sedimentarias forma parte del reservorio de Corg relevante para los inventarios.

La alta relación Corg/TN, junto con los valores isotópicos relativamente enriquecidos, apunta a un bajo grado de transformación post-deposición y una limitada influencia de fuentes externas, por ejemplo, fitoplancton o material terrestre. En conjunto, estos resultados indican un sistema bentónico dominado por material orgánico autóctono, bien conservado, y con procesos biogeoquímicos relativamente estables a lo largo del tiempo.

La cuantificación del aporte de fuentes de Corg en los sedimentos del Golfo de Batabanó, realizada mediante el modelo bayesiano de mezcla isotópica, revela que los pastos marinos constituyen la principal fuente de autóctona en este ecosistema (Fig. 5). Las contribuciones de los pastos marinos tuvieron un promedio de 64 % y oscilaron entre el 49.2 % y el 73 % según la estación analizada, valores notablemente superiores al promedio global estimado de aproximadamente 50 % para estos ecosistemas (Kennedy *et al.*, 2010).

Este hallazgo indica una fuerte dependencia del sistema bentónico del Golfo de Batabanó hacia la producción primaria local, dominada por *Thalassia testudinum*.

El gráfico de barras (Fig. 5) muestra que, además de los pastos marinos, las macroalgas representan la segunda fuente más importante de Corg, con una contribución consistente alrededor del 20 % en todas las

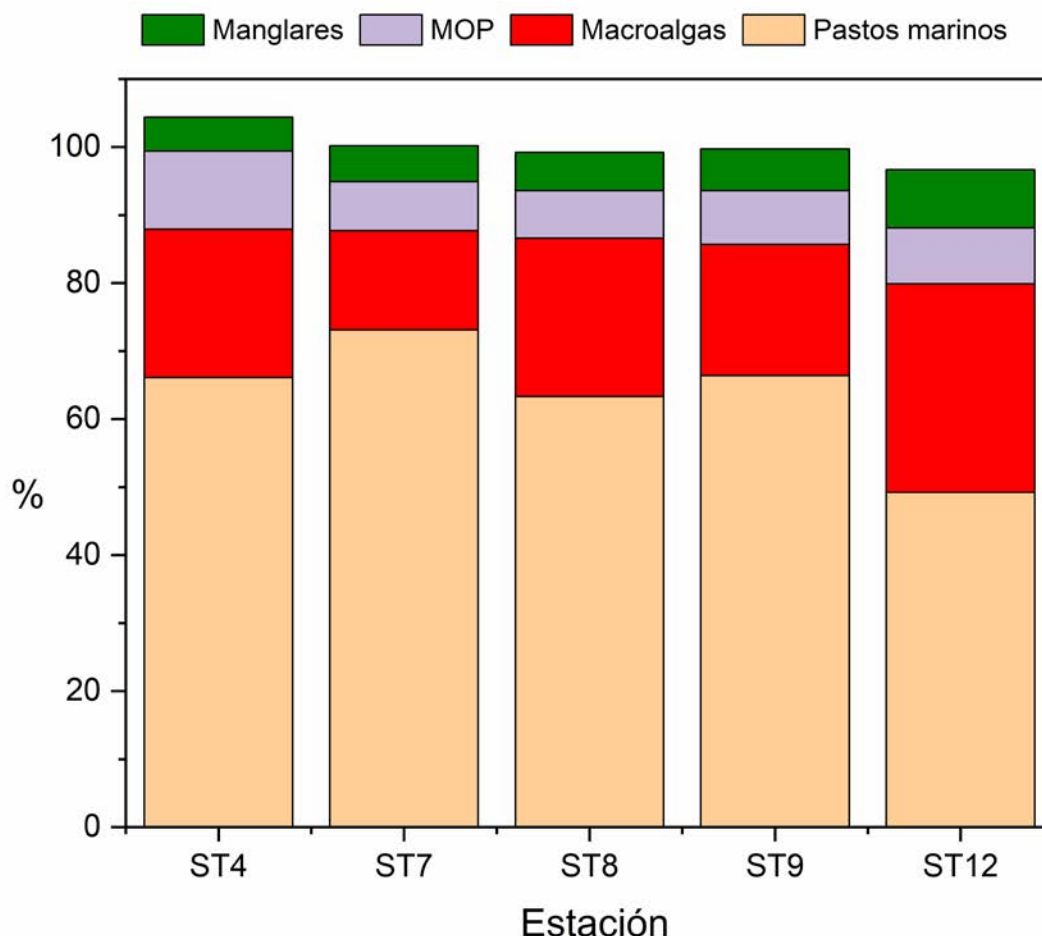


Fig. 5. Contribución en porcentaje de diferentes fuentes al Corg en los sedimentos del Golfo de Batabanó.

Fig. 5. Percentage contribution of different sources to Corg in the sediments of the Gulf of Batabanó.

estaciones, seguida de materia orgánica particulada (MOP) con un 8 % y en menor medida los manglares (6 %). La estación ST12 es la única que presenta un aumento significativo en la contribución de materia procedente de manglares (30 %), lo que sugiere una mayor influencia de este hábitat en esa zona específica del golfo.

Adicionalmente, no se observaron variaciones significativas con la profundidad en la distribución de las fuentes de Corg dentro de los perfiles sedimentarios, lo cual sugiere una notable estabilidad temporal en la composición del Corg aportado al sistema. Este patrón de estabilidad en las fuentes ha sido previamente

reportado para otros elementos como el mercurio, metales pesados y compuestos orgánicos persistentes en estudios del GB (Alonso-Hernandez *et al.*, 2015, 2011), lo que refuerza la interpretación de que este ecosistema se mantiene en condiciones prístinas, con baja influencia antropogénica y un dominio claro de fuentes autóctonas de Corg.

En conjunto, estos resultados destacan el rol crucial que juegan los pastos marinos como principales proveedores de carbono orgánico en los sedimentos del Golfo de Batabanó, consolidando su relevancia ecológica en el contexto del almacenamiento de carbono azul y como indicadores de integridad ambiental del ecosistema.

Magnitud del inventario de carbono orgánico de los sedimentos

Los inventarios de Corg medidos directamente en los perfiles sedimentarios del Golfo de Batabanó oscilaron entre 39 y 109 Mg Corg ha⁻¹, con un valor promedio de 81 Mg Corg ha⁻¹. Estos valores corresponden a profundidades reales de muestreo que variaron entre 40 y 52 cm, con un promedio de 45 cm. Las estaciones con mayores acumulaciones de carbono fueron ST9 (109 Mg Corg ha⁻¹ a 43 cm) y ST12 (94 Mg Corg ha⁻¹ a 46 cm), mientras que ST7 mostró el valor más bajo (39 Mg Corg ha⁻¹ a 40 cm). Fu *et al.* (2023) reportaron para las praderas marinas de las Bahamas inventarios similares y los perfiles sedimentarios analizados en su estudio típicamente alcanzaban profundidades menores, frecuentemente entre 13 y 15 cm.

Siguiendo las recomendaciones metodológicas de Howard *et al.* (2014) y con el objetivo de armonizar los resultados para facilitar su comparación internacional, se estimaron los inventarios de Corg extrapolados a un metro de profundidad en los sedimentos del Golfo de Batabanó. Los valores obtenidos oscilaron entre 81 y 260 Mg Corg ha⁻¹, con un promedio de 198 Mg Corg ha⁻¹ y una desviación estándar de 62 Mg Corg ha⁻¹ (Tabla 2). Al contrastar estos resultados con

los valores reportados en la literatura, se observa que los inventarios del GB superan significativamente el promedio global estimado para praderas marinas, que es de 77 Mg Corg ha⁻¹ (Kennedy *et al.*, 2010). En el contexto del Caribe y otras regiones tropicales con sistemas sedimentarios carbonatados como Australia-Gran Barrera (York *et al.*, 2018), Arabia Saudita-Mar Rojo (Serrano *et al.*, 2018), UAE-Abu Dhabi (Campbell *et al.*, 2015), Brasil (Nóbrega *et al.*, 2018), Golfo Arábico (Cusack *et al.*, 2018), Bahamas (Fu *et al.*, 2023), China (Fu *et al.*, 2021), Australia-Bahía Shark (Arias-Ortiz *et al.*, 2018), USA-Florida (Howard *et al.*, 2018), Colombia (Boca Grande, San Andrés, Cartagena y Bahía de Cocón) (Serrano *et al.*, 2021) y México (Ruiz-Fernández *et al.*, 2020), estos resultados sitúan al GB en el rango superior de almacenamiento de Corg (Fig. 6) destacando su relevancia como uno de los ecosistemas con mayor potencial de acumulación de carbono dentro de su categoría.

No obstante, es importante destacar que la extrapolación hasta 1 metro, aunque común en estudios similares para estandarizar comparaciones, puede inducir a sobreestimaciones, si se asume que las concentraciones superficiales de carbono orgánico se mantienen constantes a lo largo de todo el perfil. Por ello, los valores

Tabla 2. Tasas de acumulación de sedimentos (MAR), porcentajes de carbono orgánico (Corg) y tasas de acumulación de carbono (CAR) en praderas marinas del Golfo de Batabanó.

Table 2. Mass accumulation rates (MAR), organic carbon (Corg) percentages and carbon accumulation rates (CAR) in seagrasses beds of the Gulf of Batabano.

Estación	MAR	Incertidumbre	Corg	Incertidumbre	CAR	Incertidumbre
	(g cm ⁻² año ⁻¹)		(%)		(g Corg m ⁻² año ⁻¹)	
ST4	0.23	0.02	1.94	0.116	44.7	4.73
ST7	0.040	0.01	1.87	0.112	7.47	1.92
ST8	0.11	0.01	2.31	0.138	25.36	2.77
ST9	0.060	0.01	4.31	0.258	25.88	4.58
ST12	0.080	0.01	3.61	0.216	28.91	4.00
Promedio	0.104	0.012	2.81	0.16	26.5	3.60
Desviación Standard	0.075	0.004	1.09	0.06	13.3	1.21
Mínimo	0.040	0.010	1.86	0.112	7.47	1.92
Máximo	0.230	0.020	4.31	0.258	44.7	4.73

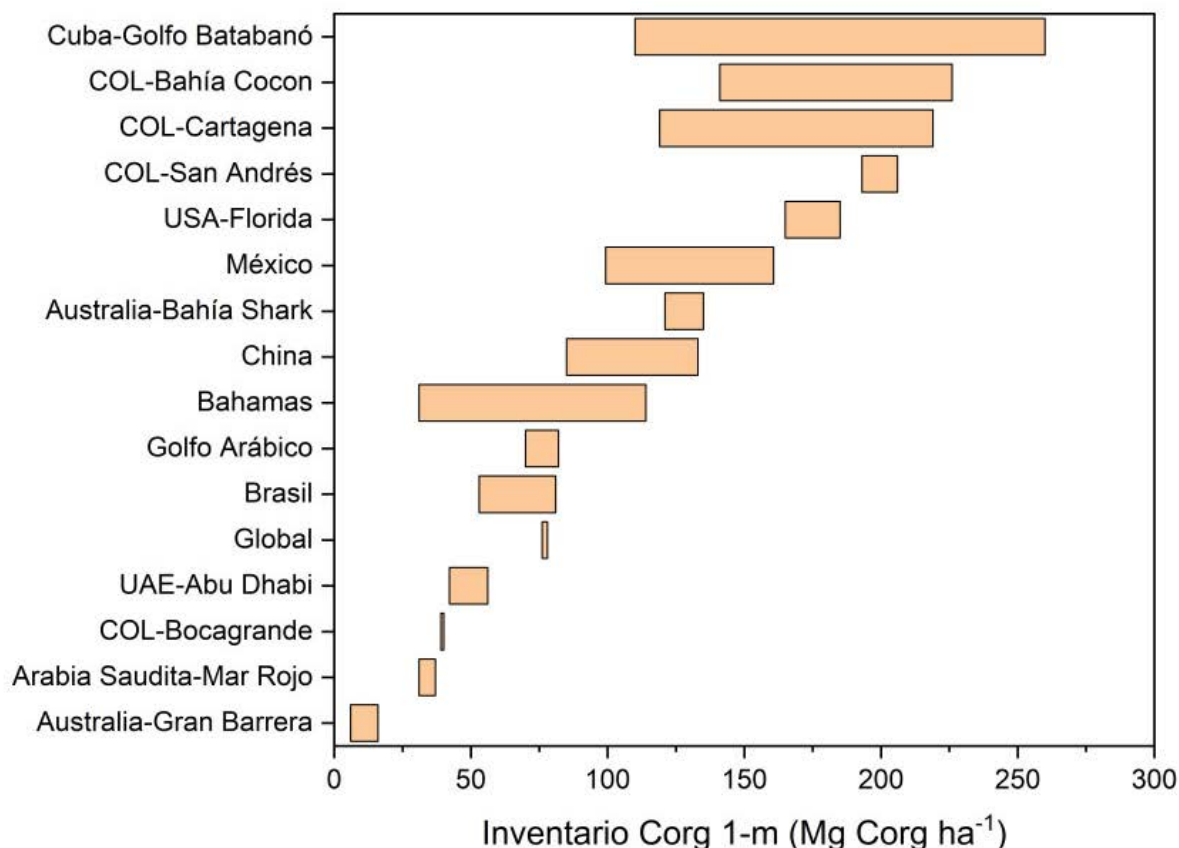


Fig. 6. Inventarios de Corg a un metro de profundidad en el Golfo de Batabanó y en praderas marinas reportadas para la región del Caribe y otras latitudes.

Fig. 6. Corg inventories at one-meter depth in the Gulf of Batabanó and in seagrass meadows reported for the Caribbean region and other latitudes.

extrapolados deben interpretarse con cautela, considerando las posibles variaciones verticales en la concentración de Corg. En este sentido, el uso de perfiles completos o modelos ajustados a la distribución vertical del Corg podría ofrecer estimaciones más precisas y representativas.

Adicionalmente, otro aspecto crítico, que limita la comparabilidad entre estudios, es la escasa información reportada sobre las fuentes de Corg presentes en los sedimentos (Dahl *et al.*, 2025), lo que incrementa la incertidumbre en las evaluaciones e impide diferenciar entre carbono autóctono (producido dentro del ecosistema) y alóctono (proveniente del exterior). Esta distinción

es fundamental, sobre todo en el contexto de iniciativas de compensación climática. Por ello, es imprescindible incorporar de forma sistemática en los estudios de carbono azul las técnicas de trazado geoquímico, como el análisis de isótopos estables de carbono ($\delta^{13}\text{C}$), biomarcadores moleculares y modelos de mezcla isotópica. Estos enfoques permiten identificar con mayor precisión el origen del Corg sedimentario y mejorar la robustez de las estimaciones de carbono azul.

A partir de la superficie de praderas marinas cartografiada para el Golfo de Batabanó (10 648 km²) por Almeida Martínez *et al.* (2025), y utilizando los valores de inventario de carbono orgánico extrapolados a

un metro de profundidad (entre 110 y 260 Mg Corg ha^{-1}), se estimó un inventario total de carbono orgánico acumulado en el metro superior del sedimento que oscila entre 0.12 y 0.28 Petagramos (Pg) de Corg para este ecosistema (Tabla 3). Esta cantidad representa entre el 7 % y el 14 % del inventario global estimado en praderas marinas, reportado entre 1.75 y 2.05 Pg Corg por McKenzie *et al.* (2020) y Kennedy *et al.* (2022). Sin embargo, es importante destacar que estas estimaciones se basan en solo cinco perfiles sedimentarios, lo cual contribuye con el conocimiento del área de estudio, pero no es suficiente para considerar estos resultados como representativos de la totalidad del área del Golfo. Por tanto, los valores deben interpretarse como aproximaciones preliminares o indicativas del potencial de almacenamiento de la región. En consecuencia, como base para mecanismos formales de créditos de carbono, se requiere un mayor nivel de resolución espacial, validación empírica y robustez estadística para cumplir con los estándares internacionales de verificación y certificación. Estos resultados, no obstante, subrayan la relevancia ecológica de las praderas marinas del GB y refuerzan la necesidad de ampliar los esfuerzos de muestreo y monitoreo para sustentar iniciativas de carbono azul en Cuba.

Tasas de acumulación de carbono orgánico

La gran mayoría de los estudios de carbono azul reportados hasta la fecha siguen las recomendaciones metodológicas de Howard *et al.* (2014), las cuales proponen la determinación de inventarios de Corg en sedimentos y su extrapolación estandarizada hasta un metro de profundidad, con el objetivo de facilitar la comparación entre sitios y ecosistemas, así como de valorizar estos ecosistemas en términos de su capacidad de almacenamiento de carbono. Sin embargo, este enfoque presenta limitaciones importantes cuando se intenta estimar el potencial climático actual o acceder a mecanismos como los mercados de carbono. Los inventarios reflejan la cantidad acumulada de carbono a lo

largo de décadas o siglos, pero no permiten determinar cuánto carbono está siendo efectivamente capturado en la actualidad. Además, extrapolar desde capas superficiales puede inducir sobreestimaciones si se asume erróneamente que las concentraciones de Corg se mantienen constantes con la profundidad. A esto se suma la elevada incertidumbre derivada de la falta de información sobre el origen de la Corg, lo que complica la distinción entre carbono autóctono y alóctono, un aspecto clave para una contabilidad climática precisa. Por estas razones, en la actualidad se reconoce que las tasas anuales de acumulación de carbono constituyen una métrica más robusta y funcional para evaluar la contribución real de los ecosistemas de carbono azul a la mitigación del cambio climático. A diferencia de los inventarios, las CAR permiten estimar los flujos netos de carbono retenidos año tras año, valorar la efectividad de las acciones de manejo, y cumplir con criterios de adicionalidad, permanencia y verificabilidad, exigidos por los estándares internacionales de proyectos de compensación de emisiones. En este contexto, las tasas de acumulación se consideran esenciales para sustentar proyectos confiables de carbono azul e integrarlos de manera efectiva en estrategias nacionales e internacionales de acción climática (Dahl *et al.*, 2025).

A partir de las tasas de acumulación másica ($\text{g cm}^{-2} \text{año}^{-1}$) reportadas por Díaz-Asencio *et al.* (2016) para los perfiles estudiados y las concentraciones de Corg (%) determinadas en esta investigación, se obtuvieron las tasas de acumulación de Corg ($\text{g Corg m}^{-2} \text{año}^{-1}$) para el área de estudio (Tabla 2).

Las tasas de acumulación de Corg en los sedimentos del GB durante el último siglo mostraron un valor promedio de $26.5 \pm 13.3 \text{ g Corg m}^{-2} \text{año}^{-1}$, con un rango que oscila entre 7.47 y 44.7 $\text{g Corg m}^{-2} \text{año}^{-1}$. Estos valores son comparables a los reportados para otros sistemas carbonatados del Caribe y el trópico occidental, como México (30.7 $\text{g Corg m}^{-2} \text{año}^{-1}$; Ruiz-Fernández *et al.*, 2020) y Bahamas (22.5 g Corg

$\text{m}^{-2} \text{año}^{-1}$; Fu *et al.*, 2023). No obstante, las tasas del Golfo de Batabanó resultan considerablemente inferiores a la media global, estimada en $139 \text{ g Corg m}^{-2} \text{año}^{-1}$ (Fu *et al.*, 2023), y también a los valores reportados para Colombia ($122 \pm 62 \text{ g Corg m}^{-2} \text{año}^{-1}$; Serrano *et al.*, 2021), China ($45 \text{ g Corg m}^{-2} \text{año}^{-1}$; Fu *et al.*, 2021) y Australia ($46 \text{ g Corg m}^{-2} \text{año}^{-1}$; Arias-Ortiz *et al.*, 2018)

Este patrón de tasas moderadas de acumulación, pese a los altos inventarios de Corg detectados en los sedimentos del golfo, es consistente con lo descrito por Fu *et al.* (2023) para las Bahamas. Factores como la baja productividad neta de *Thalassia testudinum*, la limitación de nutrientes, y la presencia de sedimentos carbonatados de granulometría gruesos —que favorecen la mezcla y descomposición del Corg— podrían explicar estas tasas relativamente bajas. A esto se suma la alta estabilidad hidrodinámica del sistema y la bioturbación que contribuyen a una deposición más lenta y a un enterramiento menos eficiente en términos de captura neta anual, aunque con una gran capacidad de almacenamiento a largo plazo. Estos resultados resaltan la necesidad de diferenciar entre reservas (inventarios) y flujos (tasas de acumulación) al evaluar el potencial climático de los ecosistemas de carbono azul, para evitar sobreestimaciones en el servicio de acumulación de carbono que prestan estos ecosistemas.

Extrapolando las tasas de acumulación de Corg al área total estimada de praderas marinas en el Golfo de Batabanó, se calcula que los sedimentos

de este ecosistema secuestran anualmente entre 0.07 y 0.48 Teragramo (Tg) de Corg. Esta cifra representa entre el 0.25 % y el 1.30 % del total anual de acumulación de Corg en sedimentos de praderas marinas a escala global, considerando la extensión documentada de estos ecosistemas (Tabla 3). Si bien estas tasas unitarias son moderadas en comparación con otras regiones, la amplia cobertura de pastos marinos en el GB y su capacidad de almacenamiento a largo plazo destacan su relevancia en el contexto del carbono azul global. En conjunto, estos hallazgos posicionan al GB como un reservorio estratégico de Corg en el Caribe, con implicaciones potenciales para iniciativas de mitigación climática, conservación costera y financiamiento basado en servicios ecosistémicos.

Implicaciones para el Cambio Climático

Cuba emite a la atmósfera anualmente unas 24.6 millones de toneladas de CO_2 , lo que representa aproximadamente el 0.06 % de las emisiones globales (37 000 millones de toneladas de CO_2 (KNOEMA, 2024; Statista, 2023). A partir de los resultados de esta investigación, y aplicando el factor de conversión $1 \text{ g Corg} = 3.67 \text{ g CO}_2$ (Howard *et al.*, 2014), se estima que los sedimentos del GB secuestran y almacenan anualmente un promedio de 1.03 millones de toneladas de CO_2 . Esta cifra equivale aproximadamente al 4.3 % de las emisiones anuales de CO_2 del país.

Tabla 3. Extensión de praderas marinas, tasas de acumulación de carbono orgánico (Corg) e inventarios de carbono almacenado en el metro superior de sedimentos, comparando datos globales con los del Golfo de Batabanó.

Table 3. Seagrass extent, organic carbon (Corg) accumulation rates and carbon stocks in the upper metre of sediment, comparing global data with those from the Gulf of Batabano.

Zona	Área de Pastos marinos (km^2)		Tasas de acumulación de Corg (Tg Corg año^{-1})		Inventarios de Corg en sedimentos (Pg)	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Global (documentado)	160387	266562	31.4	36.8	1.75	2.05
Golfo Batabanó	13818	13818	0.08	0.48	0.12	0.28
Golfo Batabanó/Global	6.64%	4.00%	0.25%	1.10%	7 %	14 %

Al extrapolar este cálculo a la superficie total de pastos marinos estimada para la plataforma cubana (29 250 km²), se proyecta preliminarmente que estos ecosistemas podrían absorber entre un 7 % y un 20 % de las emisiones anuales de CO₂ del país. Estos resultados confirman el rol estratégico de los pastos marinos cubanos en la mitigación del cambio climático y refuerzan la necesidad de integrarlos en políticas de conservación y adaptación costera.

Conclusiones

Esta investigación constituye la primera estimación del potencial de absorción de carbono de los pastos marinos en Cuba, centrada en el Golfo de Batabanó, una de las regiones con mayor cobertura de praderas marinas del país y del Caribe. Los resultados obtenidos revelan que estas praderas albergan algunos de los mayores inventarios de carbono orgánico por hectárea reportados a nivel global para el primer metro de sedimento, con reservas estimadas entre 0.12 y 0.28 Petagramo de Corg, lo que representa aproximadamente entre el 7 % y el 14 % de las reservas globales conocidas en sedimentos de praderas marinas.

Las tasas anuales de acumulación de Corg en el Golfo de Batabanó alcanzan hasta 0.48 Teragramo año⁻¹, lo que equivale al 1.7 % de las tasas globales reportadas para estos ecosistemas. A nivel nacional, estas praderas podrían estar absorbiendo anualmente el 4.3 % de las emisiones totales de CO₂ de Cuba, destacando su papel estratégico en la mitigación del cambio climático y en la implementación de políticas basadas en soluciones naturales.

Además de contribuir a mejorar las estimaciones globales de carbono azul, los datos generados en este estudio llenan una brecha geográfica crítica en la información sobre el secuestro, almacenamiento y acumulación de Corg en los sedimentos de praderas marinas, específicamente en el contexto de plataformas carbonatadas tropicales. Estos resultados sientan las bases para el desarrollo de estrategias nacionales de carbono azul en Cuba, centradas

en praderas marinas. No obstante, se requieren mayores esfuerzos para ampliar la cobertura espacial del muestreo, con el fin de caracterizar con mayor precisión las reservas y tasas de acumulación de Corg en el GB y en otras regiones de la plataforma cubana, lo que será esencial para acceder a oportunidades de financiamiento climático internacional y para respaldar políticas de gestión costera basadas en evidencia científica.

Agradecimientos

Este trabajo de investigación fue realizado en el marco del Proyecto de Cooperación Técnica del OIEA “CUB/7/010-Mejorando las Capacidades Nacionales para Monitorear los Impactos del Cambio Climático en el Medio Marino Usando Técnicas Nucleares e Isotópicas”, y el Programa Sectorial 02 de Ciencia, Tecnología e Innovación “Tecnologías de aplicaciones nucleares, la óptica, el láser y la ultrasónica para producir y generalizar bienes y servicios”. El OIEA agradece el apoyo proporcionado a sus Laboratorios de Medio Ambiente Marino por el Gobierno del Principado de Mónaco.

Los autores agradecen a Carlos M. Duarte por facilitar la obtención de los datos de isótopos estables de organismos del Golfo de Batabanó.

Declaraciones

Financiamiento

Los monitoreos y análisis realizados en este estudio han sido financiados por dos proyectos de la Agencia de Energía Nuclear y Tecnologías de Avanzada AENTA: MICATIN e ISOVIDA.

Conflicto de intereses

Los autores no tienen conflicto de intereses financieros o no financieros que declarar que sean relevantes para el contenido del manuscrito.

Comportamiento ético

No se utilizaron animales durante la realización del presente estudio.

Permisos de muestreo y otros permisos

Los autores han recibido de las autoridades pertinentes los permisos necesarios para realizar los muestreos.

Declaración sobre las contribuciones de los autores:

Conceptualización: CMAH, BMD; Metodología: MDA, YMG; Investigación: YMG, YHP; Escritura - Revisión y Edición: CMAH, BMD, YMG; Supervisión: CMAH, YHP.

Referencias

- Almeida Martínez, I., Carrillo Betancourt, Y., Ribot Guzmán, M., Olivera Acosta, J., Estrada Estrada, R., Martín Morales, G. (2025). *Cartografía de pastos marinos Com Pr: caso de estudio Golfo de Batabanó*.
- Alonso-Hernandez, C.M., Conte, F., Mistic, C., Barsanti, M., Gómez-Batista, M., Díaz-Asencio, M., Covazzi-Harriague, A., Pannacciulli, F.G. (2011). An overview of the Gulf of Batabanó (Cuba): Environmental features as revealed by surface sediment characterisation. *Cont. Shelf Res.*, 31, 749-757. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2011.01.006>
- Alonso-Hernandez, C.M., Fanelli, E., Diaz-Asencio, M., Santamaría, J.M., Morera-Gómez, Y. (2020). Carbon and nitrogen isotopes to distinguish sources of sedimentary organic matter in a Caribbean estuary. *Isot. Environ. Health Stud.*, 56, 654-672. <https://doi.org/10.1080/10256016.2020.1819263>
- Alonso-Hernandez, C.M., Garcia-Moya, A., Tolosa, I., Díaz-Asencio, M., Corcho-Alvarado, J.A., Morera-Gómez, Y., Fanelli, E. (2017). Tracing organic matter sources in a tropical lagoon of the Caribbean Sea. *Cont. Shelf Res.*, 148. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2017.08.001>
- Alonso-Hernandez, C.M., Tolosa, I., Mesa-Albernas, M., Díaz-Asencio, M., Corcho-Alvarado, J.A., Sánchez-Cabeza, J.A. (2015). Historical trends of organochlorine pesticides in a sediment core from the Gulf of Batabanó, Cuba. *Chemosphere*, 137, 95-100. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.05.044>
- Arias-Ortiz, A., Serrano, O., Masqué, P., Lavery, P.S., Mueller, U., Kendrick, G.A., Rozaimi, M., Esteban, A., Fouqurean, J.W., Marbà, N., Mateo, M.A., Murray, K., Rule, M.J., Duarte, C.M. (2018). A marine heatwave drives massive losses from the world's largest seagrass carbon stocks. *Nat. Clim. Chang.* 8, 338-344. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0096-y>
- Arias-Schreiber, M.; Wolff, M.; Cano, M.; Martínez-Daranas, B.; Marcos, Z.; Hidalgo, G.; Castellanos, G.; del Valle, R.; Abreu, M.; Martínez, J.C.; Díaz, J.; Areces, A. (2008). Changes in benthic assemblages of the Gulf of Batabanó. *PANAMJAS*, 3, 49-60.
- Bedulli, C., Lavery, P.S., Harvey, M., Duarte, C.M., Serrano, O. (2020). Contribution of Seagrass Blue Carbon Toward Carbon Neutral Policies in a Touristic and Environmentally-Friendly Island. *Front. Mar. Sci.*, 7. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00001>
- Campbell, J.E., Lacey, E.A., Decker, R.A., Crooks, S., Fouqurean, J.W. (2015). Carbon Storage in Seagrass Beds of Abu Dhabi, United Arab Emirates. *Estuaries Coasts*, 38, 242-251. <https://doi.org/10.1007/s12237-014-9802-9>
- Cordeira-Estrada, S., Lorenzo-Sánchez, S., Areces-Mallea, A., Martínez-Bayón, C. (2008). Cartografía de la distribución espacial de los hábitats bentónicos en el Golfo de Batabanó utilizando imágenes Landsat-7. *Cienc. Mar.*, 34, 213-222. <https://doi.org/10.7773/cm.v34i2.1293>
- Cusack, M., Saderne, V., Arias-Ortiz, A., Masqué, P., Krishnakumar, P.K., Rabaoui, L., Qurban, M.A., Qasem, A.M., Prihartato, P., Loughland, R.A., Elyas, A.A., Duarte, C.M. (2018). Organic carbon sequestration and storage in vegetated coastal habitats along the western coast of the Arabian Gulf. *Environ. Res. Lett.*, 13. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aac899>
- Dahl, M., Lavery, P.S., Mazarrasa, I., Samper-Villarreal, J., Adame, M.F., Crooks, S., Duarte, C.M., Friess, D.A., Krause-Jensen, D., Leiva-Dueñas, C., Lovelock, C.E., Macreadie, P.I., Masqué, P., Mateo, M.A., Serrano, O. (2025). Recommendations for strengthening blue carbon science. *One Earth*, 8(3). <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2025.101175>

- Dewsbury, B.M., Bhat, M., Fourqurean, J.W. (2016). A review of seagrass economic valuations: Gaps and progress in valuation approaches. *Ecosyst. Serv.* <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2016.02.010>
- Díaz-Asencio, M., Corcho-Alvarado, J.A., Sánchez-Cabeza, J.A., Ruiz-Fernández, A.C., Eriksson, M. (2016). Reconstruction of Recent Sedimentary Processes in a Carbonate Platform (Gulf of Batabano, Cuba) Using Environmental Radiotracers. *Estuaries Coasts*, 39. <https://doi.org/10.1007/s12237-016-0076-2>
- Duarte, C.M., Losada, I.J., Hendriks, I.E., Mazarrasa, I., Marbà, N. (2013). The role of coastal plant communities for climate change mitigation and adaptation. *Nat. Clim. Chang.*, <https://doi.org/10.1038/nclimate1970>
- Fu, C., Frappi, S., Havlik, M.N., Howe, W., Harris, S.D., Laiolo, E., Gallagher, A.J., Masqué, P., Duarte, C.M. (2023). Substantial blue carbon sequestration in the world's largest seagrass meadow. *Commun. Earth Environ.*, 4, 474. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-01154-0>
- Fu, C., Li, Y., Zeng, L., Zhang, H., Tu, C., Zhou, Q., Xiong, K., Wu, J., Duarte, C.M., Christie, P., Luo, Y., 2021. Stocks and losses of soil organic carbon from Chinese vegetated coastal habitats. *Glob. Chang. Biol.*, 27, 202-214. <https://doi.org/10.1111/gcb.15348>
- Howard, J., Hoyt, S., Isensee, K., Pidgeon, E., Telszewski, M. (2014). *Coastal Blue Carbon: Methods for Assessing Carbon Stocks and Emissions Factors in Mangroves, Tidal Salt Marshes, and Seagrass Meadows*. Conserv. Int. Intergov. Oceanogr. Comm. UNESCO, Int. Union Conserv. Nature., Arlington, Virginia, USA.
- Howard, J.L., Creed, J.C., Aguiar, M.V.P., Fourqurean, J.W. (2018). CO₂ released by carbonate sediment production in some coastal areas may offset the benefits of seagrass "Blue Carbon" storage. *Limnol. Oceanogr.*, 63, 160-172. <https://doi.org/10.1002/lno.10621>
- Kennedy, H., Beggins, J., Duarte, C.M., Fourqurean, J.W., Holmer, M., Marbà, N., Middelburg, J.J. (2010). Seagrass sediments as a global carbon sink: Isotopic constraints. *Global Biogeochem. Cycles* 24. <https://doi.org/10.1029/2010GB003848>
- Kennedy, H., Pagès, J.F., Lagomasino, D., Arias-Ortiz, A., Colarusso, P., Fourqurean, J.W., Githaiga, M.N., Howard, J.L., Krause-Jensen, D., Kuwae, T., Lavery, P.S., Macreadie, P.I., Marbà, N., Masqué, P., Mazarrasa, I., Miyajima, T., Serrano, O., Duarte, C.M. (2022). Species Traits and Geomorphic Setting as Drivers of Global Soil Carbon Stocks in Seagrass Meadows. *Glob. Biogeochem. Cycles*, 36. <https://doi.org/10.1029/2022GB007481>
- KNOEMA (2024). Cuba-Emisiones de CO₂ [WWW Document]. URL <https://knoema.es/atlas/Cuba/Emisiones-de-CO2-kt>
- Lamb, A.L., Wilson, G.P., Leng, M.J. (2006). A review of coastal palaeoclimate and relative sea-level reconstructions using $\delta^{13}\text{C}$ and C/N ratios in organic material. *Earth Sci. Rev.*, 75, 29-57. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2005.10.003>
- Martínez-Daranas, B., Suárez, A.M. (2018). An overview of Cuban seagrasses. *Bull. Mar. Sci.*, <https://doi.org/10.5343/bms.2017.1014>
- McKenzie, L.J., Nordlund, L.M., Jones, B.L., Cullen-Unsworth, L.C., Roelfsema, C., Unsworth, R.K.F. (2020). The global distribution of seagrass meadows. *Environ. Res. Lett.* <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab7d06>
- Meyers, P.A. (1997). Organic geochemical proxies of paleoceanographic, paleolimnologic, and paleoclimatic processes, in *Organic Geochemistry* (pp. 213-250). [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(97\)00049-1](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(97)00049-1)
- Meyers, P.A., 1994. Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter. *Chem. Geol.*, 114, 289-302. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)90059-0](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)90059-0)
- Nóbrega, G.N., Romero, D.J., Otero, X.L., Ferreira, T.O. (2018). Pedological studies of subaqueous soils as a contribution to the protection of seagrass meadows in Brazil. *Rev. Bras. Cienc. Solo*, 42. <https://doi.org/10.1590/18069657rbc20170117>

- Ruiz-Fernández, A.C., Sanchez-Cabeza, J.A., Cuéllar-Martínez, T., Pérez-Bernal, L.H., Carnero-Bravo, V., Ávila, E., Cardoso-Mohedano, J.G. (2020). Increasing salinization and organic carbon burial rates in seagrass meadows from an anthropogenically-modified coastal lagoon in southern Gulf of Mexico. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 242. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2020.106843>
- Schill, S.R., McNulty, V.P., Pollock, F.J., Lüthje, F., Li, J., Knapp, D.E., Kington, J.D., McDonald, T., Raber, G.T., Escovar-Fadul, X., Asner, G.P. (2021). Regional high-resolution benthic habitat data from planet dove imagery for conservation decision-making and marine planning. *Remote Sens.*, 13. <https://doi.org/10.3390/rs13214215>
- Serrano, O., Almahasheer, H., Duarte, C.M., Irigoien, X. (2018). Carbon stocks and accumulation rates in Red Sea seagrass meadows. *Sci. Rep.*, 8. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-33182-8>
- Serrano, O., Gómez-López, D.I., Sánchez-Valencia, L., Acosta-Chaparro, A., Navas-Camacho, R., González-Corredor, J., Salinas, C., Masque, P., Bernal, C.A., Marbà, N. (2021). Seagrass blue carbon stocks and sequestration rates in the Colombian Caribbean. *Sci. Rep.* <https://doi.org/10.1038/s41598-021-90544-5>
- Shayka, B.F., Hesselbarth, M.H.K., Schill, S.R., Currie, W.S., Allgeier, J.E. (2023). The natural capital of seagrass beds in the Caribbean: Evaluating their ecosystem services and blue carbon trade potential. *Biol. Lett.*, 19. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2023.0075>
- Statista (2023). *Emisiones mundiales de CO2 de 1995 a 2023*. <https://es.statista.com/estadisticas/635894/emisiones-mundiales-de-dioxido-de-carbono/#:~:text=Emisiones de dióxido de carbono a nivel mundial 1995-2023&text=A principios de siglo%2C las,2.000 millones de toneladas métricas.>
- York, P.H., MacReadie, P.I., Rasheed, M.A. (2018). Blue carbon stocks of great barrier reef deep-water seagrasses. *Biol. Lett.*, 14. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2018.0529>
- Yun, H.Y., Lee, D.H., Choi, H., Won, E., Shin, K.H. (2020). Evaluation of the quantity and the carbon isotopic composition of amino acids by using diverse sample residues after lipid extraction. *Anal. Bioanal. Chem.*, 412, 4383-4391. <https://doi.org/10.1007/s00216-020-02679-5>

Como citar este artículo

Alonso-Hernandez, C., Díaz-Asencio, M., Martínez-Daranas, B., Morera-Gómez, Y., Helguera, Y. (2024). Inventarios y tasas de acumulación de carbono orgánico en sedimentos de praderas marinas en el Golfo de Batabanó, Cuba. *Rev. Invest. Mar.*, 44(2), e-11493.