MAC 2021-2027 Cooperación Territorial | Interreg MAC | Cofinanciado por la Unión Europea | IMPLACOST

Proyecto IMPLACOST

Carbono azul en la región MACARONÉSICA

Informe Científico-Técnico

José R. Sierra-Salcedo, David Curbelo-Hernández, J. Magdalena Santana-Casiano, Adrián Castro-Álamo, Melchor González-Dávila, David González-Santana, Aridane G. González

ULPGC Universidad de Las Palmas de Gran Canaria | IOCAG Instituto Universitario de Oceanografía y Cambio Global | QUIMA Química Marina ULPGC

INFORME CIENTÍFICO-TÉCNICO

Carbono azul en la región MAC

Bases metodológicas, estado del conocimiento y marco de actuación

José R. Sierra-Salcedo, David Curbelo-Hernández, J. Magdalena Santana-Casiano, Adrián Castro-Alamo, Melchor González-Dávila, David González-Santana, Aridane G. González

Instituto de Oceanografía y Cambio Global (IOCAG)
Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC)

Autor de correspondencia: aridane.gonzalez@ulpgc.es

Este informe se ha realizado en el marco del proyecto IMPLACOST 1/MAC/2/2.4/0009: financiado en un 85 % por el Programa de Cooperación Territorial Interreg VI Madeira-Azores-Canarias (MAC) 2021-2027 del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER), y el 15% restante con fondos regionales y nacionales de los territorios participantes.

Resumen Ejecutivo

Los ecosistemas costeros constituyen una infraestructura natural relevante frente al cambio climático, ya que almacenan carbono, protegen el litoral, sostienen biodiversidad y contribuyen a la resiliencia de comunidades y actividades dependientes de la costa. En territorios insulares y archipelágicos como los que integran el espacio de cooperación MAC, su evaluación requiere además considerar la fuerte conectividad entre hábitats costeros, plataformas someras y océano abierto. En este contexto, IMPLACOST ofrece una oportunidad para transformar conocimiento científico disperso en una base técnica común para la observación, comparación y gestión del carbono azul a escala regional.

Este informe revisa los principales métodos de cuantificación del carbono azul, los estándares y marcos de referencia disponibles y el estado del conocimiento en la Macaronesia y en los países africanos abordados en el documento. La revisión muestra que existe una base metodológica internacional suficientemente madura para estimar stocks de carbono azul en sedimentos y biomasa de ecosistemas costeros con cubierta vegetal y algal, pero que su aplicación en la región MAC es todavía desigual. Las diferencias en disponibilidad de datos, infraestructura analítica, conocimiento previo de los hábitats y capacidad de seguimiento dificultan la comparación directa entre territorios.

El sedimento constituye el principal reservorio de carbono orgánico a largo plazo en los ecosistemas costeros vegetados y, por tanto, debe ocupar una posición central en el diseño de muestreo. La estimación de stocks requiere combinar el contenido de carbono orgánico, la densidad aparente y la profundidad de muestreo. La biomasa aérea y subterránea aporta información complementaria cuando se pretende construir balances más completos. Entre las técnicas analíticas consideradas, LOI (de sus siglas en ingles Loss on Ignition) y digestión húmeda (conocido como Walkley–Black) ofrecen ventajas de coste y accesibilidad, mientras que el análisis elemental de Carbono, Hidrógeno y Nitrógeno (CHN) proporciona mediciones más precisas y resulta especialmente útil como referencia para calibrar y validar métodos indirectos.

El conocimiento regional presenta una marcada asimetría. Canarias concentra la mayor base científica sobre praderas de *Cymodocea nodosa* y dispone de información sobre distribución, biomasa y carbono orgánico en sedimentos, además de observaciones de alta resolución del sistema del CO_2 en aguas costeras. Madeira y Azores cuentan con una base relevante de cartografía de hábitats, biodiversidad y estructura de comunidades, pero con menor desarrollo de datos específicamente orientados al carbono azul. Cabo Verde presenta información todavía fragmentaria y una extensión limitada de ecosistemas costeros vegetados, mientras que Santo Tomé y Príncipe dispone de estudios recientes sobre praderas marinas y manglares que evidencian un potencial significativo de almacenamiento de carbono y, al mismo tiempo, necesidades de conservación y restauración.

La revisión también indica que el papel climático de las zonas costeras no puede interpretarse únicamente a partir del carbono almacenado en sedimentos y biomasa. En plataformas insulares, el carbono puede captarse, transformarse, remineralizarse, exportarse lateralmente. Además, hay que tener en cuenta la transferencia de dióxido de carbono entre la atmósfera y el océano. Por ello, cuando el objetivo sea evaluar la función climática del sistema costero en su conjunto, conviene complementar progresivamente los stocks sedimentarios con observaciones del sistema del CO_2 y otras variables físico-químicas y biogeoquímicas de la columna de agua. Esta aproximación integrada resulta especialmente pertinente en el contexto macaronésico.

El principal valor añadido de IMPLACOST puede situarse, por tanto, en la armonización del conocimiento de las zonas costeras para buscar soluciones en materia de mitigación y adaptación al cambio climático. Más que reproducir estudios aislados con diseños diferentes, el proyecto puede establecer un marco metodológico común que permita comparar resultados entre áreas piloto, aprovechar capacidades analíticas distribuidas entre socios y generar una base regional de datos que pueda ser estable más allá de la duración del proyecto. La prioridad debería ser asegurar primero la comparabilidad de los stocks de carbono azul y, sobre esa base, avanzar gradualmente hacia una evaluación más amplia del funcionamiento del carbono costero.

Mensajes clave para la toma de decisiones
• La región MAC dispone de conocimiento suficiente para iniciar un marco común de evaluación, pero no de datos todavía homogéneos y comparables entre territorios.
• La armonización de protocolos de muestreo, análisis y tratamiento de datos debe ser un resultado central de IMPLACOST.
• LOI y Walkley–Black son opciones operativas para análisis extensivos; CHN debe actuar como método de referencia para calibración y control de calidad cuando exista capacidad.
• Canarias puede aportar experiencia científica y series de observación, mientras que otros territorios aportan contextos ecológicos complementarios; el objetivo debe ser construir capacidad regional, no trasladar un único modelo sin adaptación.
• El legado deseable del proyecto es una red de áreas piloto, un protocolo compartido, mecanismos de intercalibración y una base de datos regional que permita continuidad y actualización.

Prioridades propuestas para IMPLACOST. Se recomienda: (1) armonizar inventarios y cartografía de hábitats con potencial de carbono azul; (2) seleccionar áreas piloto representativas de los distintos contextos insulares y costeros; (3) adoptar un protocolo mínimo común para sedimentos, biomasa y variables auxiliares; (4) establecer ejercicios de intercalibración entre métodos y laboratorios; y (5) integrar de forma progresiva observaciones del sistema del CO_2 allí donde la capacidad y los objetivos de seguimiento lo permitan.

Contenido

1. Carbono azul y carbono costero en el contexto de IMPLACOST 5

2. Bases metodológicas y marcos de referencia 6

Diseño de muestreo y estimación de stocks 6

Comparación de métodos analíticos.....7

Estándares y marcos de referencia 8

3. Estado del conocimiento y oportunidades en la región MAC 9

Macaronesia: conocimiento disponible y observaciones del sistema del CO_2.....9

Socios africanos: diversidad de contextos y disponibilidad de información 11

Vacíos comunes y necesidad de armonización 13

4. Marco de actuación propuesto para IMPLACOST y la región MAC 14

5. Conclusiones y recomendaciones 15

Bibliografía 17

1. Carbono azul y carbono costero en el contexto de IMPLACOST

El proyecto IMPLACOST (Evaluación de impactos ambientales en zonas costeras y litorales por efecto del cambio climático – 1/MAC/2/2.4/0009) se enmarca en el Programa de Cooperación Interreg VI-D Madeira–Azores–Canarias (Interreg MAC), aprobado por la Comisión Europea en 2022, cuyo objetivo es fomentar la cooperación territorial entre las regiones de la Macaronesia y países terceros de la costa occidental africana para abordar retos comunes asociados al medio marino y costero.

En este contexto, IMPLACOST tiene como objetivo principal la evaluación de los impactos del cambio climático en las zonas costeras y litorales, contribuyendo a la mejora del conocimiento científico y técnico para la gestión y planificación de estos territorios. El proyecto se alinea con los objetivos del programa Interreg MAC relacionados con la adaptación al cambio climático y la gestión de riesgos en áreas costeras, especialmente en contextos insulares.

Las actividades de IMPLACOST incluyen la generación de información sobre la dinámica costera, la identificación de escenarios futuros de cambio y el análisis de riesgos naturales, proporcionando una base técnica para la toma de decisiones y el diseño de estrategias de adaptación. En este marco, la evaluación de servicios ecosistémicos costeros, entre ellos el secuestro y almacenamiento de carbono, aporta una dimensión complementaria a la gestión sostenible del litoral.

El concepto de carbono azul engloba el carbono capturado y almacenado por ecosistemas oceánicos y costeros. Manglares, marismas salinas y praderas marinas se encuentran entre los sistemas más reconocidos por albergar reservas elevadas de carbono por unidad de superficie y por combinar esa función con servicios de protección costera y mantenimiento de biodiversidad (Lovelock & Reef, 2020; Hilmi et al., 2021; Bindoff et al., 2019). La integración de estos ecosistemas en la planificación ambiental permite vincular conservación, restauración, adaptación y, potencialmente, mecanismos de financiación climática (Howard et al., 2014).

En la Macaronesia y en los países africanos vinculados al espacio de cooperación MAC, la relevancia de este enfoque está condicionada por la diversidad ambiental. Las plataformas insulares son estrechas, discontinuas y altamente heterogéneas, y los hábitats costeros presentan diferencias importantes en extensión, estructura y grado de conocimiento. Por ello, la evaluación regional requiere metodologías comunes suficientemente rigurosas para ser comparables, pero también flexibles para adaptarse a capacidades analíticas y condiciones logísticas muy distintas.

Además, el carbono azul no debe interpretarse únicamente como almacenamiento sedimentario. En los sistemas costeros, el carbono puede ser captado, transformado, exportado lateralmente, transferido verticalmente o intercambiado con la atmósfera. El intercambio aire–mar de CO_2 permite evaluar si las aguas superficiales actúan como fuente o sumidero atmosférico en un momento determinado, mientras que los sedimentos integran procesos de acumulación y retención a escalas temporales más largas. Esta distinción evita equiparar captación atmosférica con secuestro permanente, o emisión de CO_2 con ausencia de almacenamiento o exportación.

En este informe se mantiene el carbono azul como eje principal, dado que es el concepto asociado a los ecosistemas costeros vegetados y a los estándares revisados. De forma complementaria, se emplea la expresión carbono costero para referirse, cuando sea necesario, a una visión funcional más amplia que conecte stocks sedimentarios y de biomasa con procesos de

la columna de agua, intercambio aire–mar y exportación lateral. Esta ampliación resulta especialmente útil para interpretar el funcionamiento de sistemas insulares.

El objetivo del informe es revisar los principales métodos de cuantificación del carbono azul, los estándares existentes a escala internacional y nacional, y el estado actual de los datos disponibles en las regiones que forman parte de IMPLACOST. A partir de esa revisión se propone un marco de actuación común orientado a la comparabilidad regional, al fortalecimiento de capacidades y a la continuidad de las observaciones más allá del proyecto.

2. Bases metodológicas y marcos de referencia

La cuantificación del carbono azul requiere un diseño de muestreo que represente adecuadamente los principales reservorios y que permita extrapolar resultados a escalas espaciales relevantes. La elección de técnicas analíticas debe responder simultáneamente a criterios de precisión, coste, disponibilidad de equipamiento, seguridad, logística y posibilidad de replicar el procedimiento entre socios.

Diseño de muestreo y estimación de stocks

El muestreo mediante testigos de sedimento (cores) constituye la principal estrategia para la cuantificación del carbono azul en ecosistemas costeros con vegetación, ya que el sedimento representa el mayor reservorio de carbono orgánico a largo plazo. En estos sistemas, el carbono se acumula principalmente en forma de materia orgánica degradada, raíces, rizomas y restos vegetales, integrando procesos de almacenamiento que pueden abarcar escalas temporales de décadas a siglos. La extracción de cores permite caracterizar la distribución vertical del carbono orgánico y estimar las existencias totales de carbono del fondo. Para ello, se recomienda el uso de equipos de muestreo que minimicen la compactación del sedimento y conserven la estructura del core (Howard et al., 2014).

En ecosistemas costeros con vegetación, la biomasa aérea y subterránea constituye un componente relevante del carbono orgánico total y puede ser incluida en los diseños de muestreo, particularmente en estudios orientados a balances completos de carbono. La biomasa aérea comprende el material vegetal vivo situado por encima del sedimento, mientras que la biomasa subterránea está formada principalmente por raíces y rizomas enterrados en el suelo.

Las técnicas de muestreo de biomasa varían en función del tipo de ecosistema (manglares, marismas o praderas marinas) y suelen implicar la delimitación de parcelas y la recolección directa del material vegetal. No obstante, diversos protocolos coinciden en que, en términos de almacenamiento a largo plazo, la contribución de la biomasa es generalmente menor que la del sedimento, por lo que su muestreo puede considerarse complementario al de los núcleos de suelo (Howard et al., 2014; UICN, 2021).

La profundidad de muestreo es un aspecto crítico en la estimación de las existencias de carbono azul, ya que determina la fracción del reservorio de carbono del suelo que se incluye en el análisis. A diferencia de los ecosistemas terrestres, donde el muestreo suele limitarse por encima de 1 m, los ecosistemas costeros con vegetación presentan sedimentos orgánicos que pueden alcanzar profundidades superiores a 1 m. Los protocolos internacionales recomiendan, de forma general, muestrear hasta una profundidad de referencia de 1 m, siempre que las condiciones del sedimento lo permitan. Sin embargo, en la práctica, las mayores variaciones en

el contenido de carbono orgánico suelen concentrarse en los primeros 15–50 cm superficiales, por lo que estas capas reciben una mayor resolución de muestreo. La profundidad final debe adaptarse a las características geomorfológicas, sedimentarias y logísticas de cada región, especialmente en contextos insulares.

La estimación de los stocks de carbono azul en sedimentos requiere la integración del contenido de carbono orgánico, la densidad aparente del sedimento y la profundidad de muestreo. A partir de estos parámetros es posible calcular la densidad de carbono y extrapolar los valores a escalas espaciales relevantes, expresadas habitualmente en Mg C ha^{-1} (Howard et al., 2014).

En estudios de praderas marinas, se utilizan valores medios de densidad aparente del sedimento cuando no se dispone de mediciones específicas, lo que permite comparaciones entre zonas y metodologías (Fourqurean et al., 2012). La combinación de distintos métodos analíticos para la determinación del carbono orgánico facilita la evaluación de la incertidumbre asociada a cada técnica y refuerza la robustez de las estimaciones de stocks de carbono azul.

Comparación de métodos analíticos

El contenido de carbono orgánico en sedimentos puede determinarse mediante diferentes enfoques analíticos, cuya elección depende en gran medida de la disponibilidad de equipamiento, el tipo de muestra y los objetivos del estudio. En el ámbito del carbono azul, los métodos más empleados incluyen técnicas instrumentales de combustión, métodos indirectos basados en relaciones empíricas y procedimientos químicos de oxidación húmeda (Howard et al., 2014).

Entre las opciones disponibles se encuentran el uso de analizadores elementales, que permiten una cuantificación directa y precisa del contenido de carbono; la estimación del carbono orgánico a partir de la materia orgánica mediante la pérdida por ignición (LOI); y métodos de digestión húmeda, como el método de Walkley–Black, caracterizado por su simplicidad y bajo requerimiento instrumental. Cada uno de estos métodos presenta ventajas y limitaciones que condicionan su aplicabilidad en estudios de ecosistemas costeros, especialmente en regiones insulares y en proyectos de monitoreo como IMPLACOST.

El método Walkley–Black se basa en la oxidación parcial del carbono orgánico mediante dicromato de potasio en medio ácido, seguida de una valoración del exceso de agente oxidante (Walkley y Black, 1934; Jackson, 1958). Incorpora un factor de corrección para estimar el contenido total de carbono orgánico y se ha utilizado ampliamente por su bajo coste, facilidad de implementación y reproducibilidad, aunque puede subestimar contenidos elevados o compuestos complejos y depende de la precisión de la titulación y del factor de recuperación (Walkley, 1947; Charles & Simmons, 1986; Pribyl, 2010; Ratefinjanahary et al., 2025).

El análisis elemental CHN determina carbono, hidrógeno y nitrógeno mediante combustión completa de la muestra a alta temperatura y cuantificación de los gases generados. Proporciona mediciones directas y precisas del contenido de carbono, pero exige instrumentación costosa, mantenimiento y personal especializado, lo que limita su utilización rutinaria en algunos territorios insulares (Howard et al., 2014).

La pérdida por ignición (Loss on Ignition, LOI) estima la materia orgánica a partir de la diferencia de peso antes y después de la combustión. No mide directamente el carbono orgánico y requiere relaciones empíricas para convertir materia orgánica en carbono. Su principal ventaja es la sencillez y el bajo requerimiento instrumental; su principal limitación es que los factores de

conversión varían con el tipo de sedimento, la vegetación y la profundidad, pudiendo generar sobreestimaciones o subestimaciones (Ben-Dor & Banin, 1989; Heiri et al., 2001; Nelson & Sommers, 1996; Fourqurean et al., 2012; Salehi et al., 2011; Wang et al., 2012).

En regiones insulares, la accesibilidad a los sitios, las condiciones marítimas, la vegetación densa, la presencia de macroalgas y la necesidad de permisos en hábitats protegidos pueden condicionar el muestreo. También resultan críticos el transporte y la conservación de las muestras. Por ello, la combinación de métodos debe adaptarse a las capacidades locales sin perder un núcleo metodológico común. En IMPLACOST, LOI y Walkley–Black son opciones viables para seguimiento en distintas áreas de la región MAC, mientras que CHN puede concentrarse en la calibración y validación de factores empíricos locales, equilibrando coste, precisión e infraestructura disponible.

Tabla 1. Comparación operativa de los métodos revisados y función potencial dentro de un esquema regional de seguimiento.

Método	Tipo de medida	Fortalezas	Limitaciones	Papel propuesto en IMPLACOST
Walkley–Black	Oxidación húmeda; estimación de C orgánico	Coste bajo; equipamiento básico; amplia experiencia de uso	Oxidación incompleta; sensibilidad al factor de recuperación y a la titulación	Seguimiento extensivo cuando exista capacidad química y protocolos de seguridad
LOI	Estimación indirecta a partir de materia orgánica	Muy accesible; bajo coste; útil para cribado y series amplias	No mide C directamente; factores de conversión dependientes del sedimento	Caracterización extensiva y comparaciones internas, con calibración local
CHN	Medición elemental directa	Alta precisión; referencia cuantitativa	Coste y requerimientos de laboratorio especializado	Calibración, validación, control de calidad e intercomparación entre métodos

Estándares y marcos de referencia

A nivel internacional, la cuantificación y gestión del carbono azul se apoya principalmente en marcos metodológicos desarrollados en el ámbito de la ciencia aplicada y de los mercados voluntarios de carbono. El documento de referencia más ampliamente aceptado es el manual elaborado por The Blue Carbon Initiative (Howard et al., 2014), coordinado por Conservación Internacional, la Comisión Oceanográfica Intergubernamental de la UNESCO y la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN). Este manual establece directrices estandarizadas para la estimación de existencias (stocks) de carbono y factores de emisión en manglares, marismas mareales y praderas de fanerógamas marinas, y constituye la base metodológica de numerosos proyectos y estándares posteriores.

En el ámbito de los estándares voluntarios, existe un papel central a través del Verified Carbon Standard (VCS), que incluye metodologías específicas aplicables a ecosistemas costeros, como la VM0033 Methodology for Tidal Wetland and Seagrass Restoration, orientada a proyectos de restauración de marismas y praderas marinas, y el REDD+ Methodology Framework (VM0007). Complementariamente, el Community, Climate, and Biodiversity

Standard (CCB) permite evaluar los beneficios sociales y de biodiversidad asociados a los proyectos de carbono, reforzando su enfoque integral (Verra, 2026).

Otro marco relevante es el desarrollado por la Plan Vivo Foundation, cuyo Plan Vivo Standard (V5) contempla proyectos de carbono basados en la naturaleza, incluyendo metodologías para la restauración de manglares mediante esquemas de forestación y reforestación, como la AR-AM0014. Estos estándares se aplican principalmente en contextos de mercados voluntarios y destacan por su énfasis en la participación comunitaria y los beneficios socioeconómicos locales (Plan Vivo Foundation, 2026).

En España no existe, de acuerdo con la revisión recogida en este informe, un estándar estatal específico para la cuantificación del carbono azul. El Estándar Andaluz de Carbono Azul constituye la principal referencia autonómica identificada: toma como base el manual internacional de Howard et al. (2014), incorpora la experiencia del proyecto LIFE Blue Natura y se inserta en un marco regional de compensación de emisiones. Aunque dicho marco no está diseñado específicamente para los ecosistemas y condiciones de la Macaronesia, ofrece una referencia útil sobre cómo traducir metodologías científicas a instrumentos de gestión y valorización.

Para IMPLACOST, estos marcos deben entenderse principalmente como referencias de calidad y comparabilidad. La prioridad inmediata no es replicar un estándar de mercado voluntario, sino asegurar trazabilidad de muestras, consistencia en las unidades, documentación de incertidumbres, procedimientos de control de calidad y capacidad de reproducir las estimaciones entre áreas piloto.

3. Estado del conocimiento y oportunidades en la región MAC

El conocimiento sobre ecosistemas costeros vegetados y su papel en el ciclo del carbono es desigual entre los territorios analizados. Esta heterogeneidad es una de las principales conclusiones de la revisión: algunos socios disponen de cartografía, series ecológicas y datos biogeoquímicos, mientras que otros cuentan todavía con inventarios parciales o estudios localizados. Lejos de invalidar una aproximación regional, esta diversidad refuerza la necesidad de definir un conjunto mínimo común de variables y procedimientos.

Macaronesia: conocimiento disponible y observaciones del sistema del CO_2

El conocimiento sobre los ecosistemas costeros vegetados y su papel en el ciclo del carbono en la región macaronésica es desigual entre archipiélagos. En general, los estudios se han centrado principalmente en la distribución, ecología y cartografía de la vegetación marina costera, mientras que la cuantificación explícita del carbono azul es relativamente reciente y limitada. Las Islas Canarias constituyen el archipiélago mejor documentado, especialmente en relación con las praderas de *C. nodosa*, cuya presencia, estructura y función ecológica han sido ampliamente descritas desde finales del siglo XX (Afonso-Carrillo & Gil-Rodríguez, 1980; Wildpret de la Torre & Del Arco Aguilar, 1987; Reyes, 1995; Brito-Castro, 1999; Tuya et al., 2014).

En la última década, estos estudios se han ampliado para incluir estimaciones de carbono orgánico en sedimentos y biomasa asociada, evidenciando un mayor almacenamiento de carbono

en sedimentos vegetados en comparación con fondos desnudos o arenosos circundantes (Bañolas et al., 2020; Fourqurean et al., 2012; Yamuza-Magdaleno et al., 2024).

En contraste, en Madeira y Azores la literatura científica se ha centrado mayoritariamente en la biodiversidad marina, la estructura de comunidades bentónicas y la cartografía de hábitats costeros, con una presencia mucho menor de estudios específicamente orientados al carbono azul. En estas regiones, la información disponible sobre fanerógamas marinas y su función como sumideros de carbono es fragmentaria y suele abordarse de manera indirecta dentro de estudios ecológicos generales (Wirtz, 1995; Alberto et al., 2008; Andrade et al., 2008; Cunha et al., 2013; Martins et al., 2016).

Los datos disponibles en la Macaronesia incluyen principalmente información espacial sobre la presencia y extensión de hábitats costeros vegetados, obtenida mediante cartografía bentónica, buceo científico y, en algunos casos, sensores remotos. En Canarias, además de mapas de distribución de *C. nodosa* (Montero-Hidalgo et al., 2023), existen datos puntuales sobre biomasa aérea y subterránea, contenido de carbono orgánico en sedimentos superficiales y comparaciones entre zonas vegetadas y no vegetadas (Pavón-Salas et al., 2000; Bañolas et al., 2020). Estudios recientes han comenzado a estimar stocks de carbono y a comparar metodologías analíticas, alineándose con enfoques propuestos a escala global (Fourqurean et al., 2012; Howard et al., 2014).

Por el contrario, en Madeira y Azores los datos disponibles se limitan principalmente a la caracterización de hábitats, inventarios de biodiversidad y evaluaciones del estado ecológico de las zonas costeras, sin bases de datos consolidadas que incluyan variables biogeoquímicas relacionadas con el carbono azul (Wirtz, 1995; Alberto et al., 2008; Andrade et al., 2008; Cunha et al., 2013; Martins et al., 2016).

Además de los estudios centrados en sedimentos, biomasa y cartografía de hábitats, Canarias dispone de un sistema creciente de observación de alta resolución del sistema del CO_2 en aguas costeras y oceánicas adyacentes. Entre estas iniciativas destacan la Red de Observación del Sistema del CO_2 en Canarias (CARBOCAN), impulsada con financiación del Gobierno de Canarias, y la Red de Observación de la Acidificación Oceánica de Canarias (CanOA), desarrollada en el marco del programa CanBIO. Ambas iniciativas son operadas científicamente por el grupo de Química Marina (QUIMA) del Instituto de Oceanografía y Cambio Global (IOCAG) de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria y combinan estaciones fijas, boyas instrumentadas y líneas de observación mediante buques de oportunidad. Parte de estas observaciones se integra, además, en infraestructuras y redes internacionales de referencia para el seguimiento del carbono oceánico y la acidificación, entre ellas ICOS-ERIC, SOCAT y GOA-ON (Curbelo-Hernández et al., 2021; González et al., 2024).

Las observaciones disponibles muestran que el sistema del carbono en las aguas superficiales del archipiélago presenta una marcada variabilidad espacial y temporal, resultado de la interacción entre forzamientos térmicos, procesos biológicos y mecanismos físicos de transporte y mezcla. En el Atlántico nororiental próximo a Canarias, la temperatura superficial del mar constituye uno de los principales controles de la variabilidad estacional de la fugacidad de CO_2 (fCO_2), mientras que la actividad biológica, la advección, el afloramiento y otros procesos físicos modulan significativamente dicha señal (Curbelo-Hernández et al., 2021, 2023). Esta complejidad es particularmente evidente en ambientes costeros insulares someros. En la bahía de Gando, por ejemplo, una serie temporal de alta frecuencia entre 2020 y 2023 mostró una

amplitud estacional considerable de la fCO_2 superficial, con máximos durante los meses cálidos, así como una contribución relevante de procesos no térmicos relacionados con la mezcla, las mareas, el viento y la actividad biológica (González et al., 2024). En consecuencia, las aguas costeras someras del archipiélago no deberían tratarse, desde el punto de vista biogeoquímico, como una mera prolongación de las aguas oceánicas circundantes.

Las observaciones recientes también evidencian cambios interanuales relevantes. En la bahía de Gando, González et al. (2024) estimaron para 2020–2023 un incremento de la fCO_2 superficial de aproximadamente 1,9 µatm año^{-1} y caracterizaron el área, en promedio, como una fuente débil de CO_2 hacia la atmósfera. A una escala espacial más amplia, la integración de observaciones procedentes de boyas y buques de oportunidad entre 2019 y 2024 mediante técnicas de observación remota y aprendizaje automático ha permitido estimar para las aguas del archipiélago una tendencia creciente de pCO_2 de 3,51 ± 0,31 µatm año^{-1}, acompañada de una tendencia de acidificación de aproximadamente −0,003 ± 0,001 unidades de pH año^{-1} (Sánchez-Mendoza et al., 2026). Dicho estudio indica asimismo una evolución regional desde una fuente débil de CO_2 en 2019 hacia una emisión neta mayor en 2024, así como la transición, después de 2022, de determinados sectores orientales que previamente presentaban balances anuales de sumidero hacia condiciones de fuente neta de CO_2 (Sánchez-Mendoza et al., 2026).

Estos resultados ponen de manifiesto que el papel de las plataformas insulares y aguas costeras someras dentro del ciclo regional del carbono puede modificarse sustancialmente en escalas temporales relativamente cortas. También muestran que la caracterización del carbono costero basada exclusivamente en stocks de biomasa o carbono sedimentario proporciona una información distinta, aunque complementaria, de la obtenida mediante el estudio del sistema carbonato y de los flujos aire-mar de CO_2. Por tanto, cuando el objetivo sea avanzar desde la estimación de existencias de carbono hacia una evaluación más completa del presupuesto de carbono de un determinado sistema costero, resulta recomendable integrar ambos tipos de aproximaciones.

En este sentido, las observaciones del sistema del CO_2 aportan un marco dinámico para interpretar los datos de carbono almacenado en sedimentos y biomasa. La variabilidad observada en Canarias demuestra que la condición de fuente o sumidero atmosférico de CO_2 puede variar tanto espacialmente como entre estaciones y años (Curbelo-Hernández et al., 2021; González et al., 2024; Sánchez-Mendoza et al., 2026). Esta aproximación no sustituye a la cuantificación de stocks de carbono azul ni permite inferir directamente el almacenamiento de carbono a largo plazo a partir de medidas de pCO_2. Sin embargo, en localidades seleccionadas, la combinación de stocks sedimentarios y de biomasa con series temporales del sistema carbonato, productividad, transporte físico e intercambio aire-mar de CO_2 permitiría avanzar hacia balances de carbono costero más completos y reducir el riesgo de interpretar el almacenamiento de carbono de manera aislada de los procesos que determinan su transformación, exportación y eventual retorno a la atmósfera.

Socios africanos: diversidad de contextos y disponibilidad de información

El programa INTERREG MAC incluye, además de la región macaronésica, varios países de África occidental caracterizados por una elevada dependencia de los ecosistemas costeros y una alta vulnerabilidad frente al cambio climático, entre ellos Cabo Verde, Costa de Marfil, Gambia, Ghana, Mauritania, Senegal y Santo Tomé y Príncipe. Estas regiones albergan manglares, estuarios y humedales costeros que proporcionan servicios ecosistémicos clave, incluyendo la

protección costera, el soporte a la pesca artesanal y el almacenamiento de carbono orgánico, aunque el grado de conocimiento científico y disponibilidad de datos varía notablemente entre países (UNEP, 2020).

Cabo Verde presenta un contexto singular dentro de África occidental debido a su carácter insular, clima predominantemente árido y a la limitada extensión de ecosistemas costeros vegetados. En evaluaciones regionales de la costa atlántica africana se indica que, entre Cabo Verde y Liberia, la línea de costa está dominada por ambientes de alta energía y estuarios profundamente ramificados, condiciones poco favorables para el desarrollo de manglares extensos (Saenger & Bellan, 1995). Hasta hace poco, no se habían reportado praderas marinas en el archipiélago; sin embargo, un estudio reciente documentó por primera vez la presencia de la fanerógama *Halodule wrightii* en la isla de Santiago, formando pequeños parches en fondos arenosos someros, y se identificaron además otros dos sitios potenciales para su crecimiento (Creed et al., 2016). En coherencia con ello, los inventarios recientes de hábitats marinos y costeros no confirman la presencia actual de manglares en Cabo Verde, mientras que sí documentan la existencia de sebadales y otros hábitats costeros como salinas, aunque con una cobertura espacial limitada (UNEP-WCMC, 2026).

Los estudios realizados en el país se han centrado principalmente en la identificación y cartografía de hábitats marinos y costeros, así como en la evaluación de la biodiversidad y la vulnerabilidad frente al cambio climático. Sin embargo, la información disponible sigue siendo fragmentaria y, en la actualidad, existe una carencia significativa de datos que permita evaluar el estado de conservación de estos hábitats o cuantificar de forma directa las existencias de carbono azul asociadas. Esta falta de información subraya la necesidad de estudios específicos que aborden el papel potencial de los ecosistemas vegetados costeros en la mitigación y adaptación al cambio climático en contextos insulares áridos como el de Cabo Verde.

Santo Tomé y Príncipe es un pequeño estado insular en el Golfo de Guinea, con ecosistemas costeros vegetados frágiles y de distribución muy localizada. Los sebadales han sido descritos por primera vez recientemente, mostrando la presencia de *H. wrightii* en varias localidades de la costa noreste de São Tomé y de Príncipe, con áreas de hasta 1.500 ha en Cabras Islet y pequeñas poblaciones de 135 m² en Príncipe. Los estudios indican diferencias notables en biomasa, densidad y contenido de carbono foliar (41%) entre las islas, sugiriendo un papel relevante de estos hábitats en la fijación de carbono y en la caracterización de las condiciones ambientales locales (Alexandre et al., 2017; UNEP-WCMC, 2026).

Por otro lado, los manglares en Santo Tomé y Príncipe cubren aproximadamente 180 ha, distribuidas principalmente en São Tomé (97%) y el resto en Príncipe, con seis especies dominadas por *Rhizophora racemosa*, R. mangle y *Avicennia germinans*. Las evaluaciones detalladas mediante mapeo remoto y censos de parcelas muestran variaciones en densidad de árboles, área basal y biomasa, estimando un carbono en biomasa de 157,9 Mg C ha^{-1} y un carbono total del ecosistema de aproximadamente 938 Mg C ha^{-1}. La degradación localizada por sobreexplotación de madera, desarrollo costero y disposición de residuos pone de relieve la necesidad de restauración y conservación (Mbatha et al., 2025; Haroun et al., 2018).

Estos estudios constituyen la base de datos más reciente sobre la distribución, estado y potencial de los ecosistemas vegetados costeros de Santo Tomé y Príncipe, evidenciando tanto su valor ecológico y de carbono azul como las amenazas existentes y las oportunidades de gestión

mediante restauración, protección de hábitats y ecoturismo (Alexandre et al., 2017; Haroun et al., 2018; UNEP-WCMC, 2026).

Tabla 2. Síntesis del estado del conocimiento descrito en el informe y vacíos prioritarios para una aproximación regional.

Territorio	Base de conocimiento descrita	Principal fortaleza	Vacío prioritario identificado
Canarias	Cartografía de praderas, biomasa, C orgánico sedimentario y observaciones del sistema del CO_2	Mayor base científica dentro de la Macaronesia	Inventario sistemático comparable y series integradas de stocks y procesos
Madeira y Azores	Cartografía de hábitats, biodiversidad y estructura de comunidades	Conocimiento ecológico y espacial de base	Datos biogeoquímicos y estimaciones directas de carbono azul
Cabo Verde	Inventarios de hábitats y registros recientes de praderas marinas	Contexto insular árido de alto valor comparativo	Cuantificación directa de stocks y estado de conservación
Santo Tomé y Príncipe	Datos recientes sobre praderas y manglares, biomasa y carbono	Existencia de ecosistemas costeros vegetados con datos cuantitativos	Seguimiento, conservación y comparabilidad con protocolos regionales

Vacíos comunes y necesidad de armonización

A pesar de los avances registrados, persisten importantes vacíos de información en la Macaronesia que dificultan una evaluación integrada del carbono azul. A escala regional, falta una cuantificación sistemática y comparable de los stocks de carbono orgánico asociados a ecosistemas costeros vegetados, así como información sobre su variabilidad espacial y temporal. Esta limitación es especialmente notable fuera del archipiélago canario, donde prácticamente no existen estimaciones directas de carbono azul.

Asimismo, la ausencia de metodologías estandarizadas de muestreo y análisis limita la comparabilidad entre estudios y regiones, un aspecto ya señalado en revisiones internacionales sobre carbono azul (Fourqurean et al., 2012; Howard et al., 2014). La carencia de series temporales largas y de datos integrados a escala macaronésica refuerza la necesidad de enfoques coordinados que permitan armonizar métodos y generar información útil para la gestión costera y la adaptación al cambio climático, en línea con los objetivos del proyecto IMPLACOST.

A estos vacíos se suma la escasez de observaciones integradas que conecten los stocks sedimentarios de carbono con la dinámica del CO_2 en la columna de agua, el intercambio aire-mar, la exportación lateral y la conectividad entre hábitats costeros y aguas oceánicas. Esta limitación dificulta la evaluación del papel real de las zonas costeras insulares dentro del presupuesto regional de carbono.

4. Marco de actuación propuesto para IMPLACOST y la región MAC

El objetivo de actuación debe establecer un núcleo común de variables, procedimientos y controles que garantice comparabilidad, dejando módulos adicionales para responder a las particularidades ecológicas y a las capacidades de cada socio.

Los métodos de estimación de carbono azul, especialmente los basados en el análisis de carbono orgánico en sedimentos, son aplicables en distintos contextos de la Macaronesia y África occidental. Sin embargo, la heterogeneidad ambiental y metodológica observada exige estandarizar protocolos de muestreo, análisis y tratamiento de datos. IMPLACOST puede desempeñar un papel estructurante al definir prioridades de muestreo, cubrir vacíos en áreas estratégicas y facilitar que los resultados generados por socios diferentes puedan integrarse en una lectura regional.

1. Inventario y selección de áreas piloto. Consolidar la cartografía disponible de hábitats costeros vegetados y seleccionar sitios que representen distintos tipos de ecosistema, condiciones geomorfológicas, presiones y niveles de conocimiento. La selección debe combinar representatividad ambiental con viabilidad logística y continuidad potencial del seguimiento.

2. Protocolo mínimo común. Definir un paquete obligatorio para todas las áreas piloto: identificación del hábitat, localización y metadatos, extracción de núcleos de sedimento, profundidad documentada, densidad aparente, contenido de carbono orgánico y criterios comunes para el cálculo y expresión de stocks. La biomasa puede incorporarse cuando el objetivo requiera balances más completos y el tipo de ecosistema lo justifique.

3. Estrategia analítica escalonada. Utilizar métodos accesibles como LOI o Walkley–Black para ampliar cobertura espacial y temporal, siempre acompañados de procedimientos de calibración y control de calidad. El análisis CHN debe emplearse sobre conjuntos representativos de muestras para validar relaciones locales, cuantificar sesgos y facilitar la comparación entre laboratorios y territorios.

4. Intercalibración y gestión del dato. Organizar ejercicios con muestras compartidas o materiales de referencia entre laboratorios, documentar protocolos y mantener metadatos suficientes para reconstruir cada estimación. El producto regional debe ser una base de datos común o interoperable, con unidades y campos armonizados, no una mera agregación de resultados finales.

5. Integración progresiva del sistema del CO_2. En sitios donde existan capacidad e interés científico, complementar los stocks sedimentarios con observaciones del sistema del CO_2, parámetros fisicoquímicos y variables biogeoquímicas de la columna de agua. Este módulo permitirá investigar si el carbono procesado en plataformas someras se almacena localmente, se exporta hacia el océano o retorna a la atmósfera, sin confundir flujos de corto plazo con secuestro de largo plazo.

6. Continuidad y transferencia. Diseñar protocolos y productos pensando en su uso posterior al proyecto. La documentación, la formación cruzada entre socios y la selección de variables sostenibles en coste son esenciales para que la red pueda mantenerse, actualizarse y apoyar futuras decisiones de conservación, restauración y adaptación costera.

Tabla 3. Hoja de ruta propuesta para convertir la revisión metodológica en resultados comparables y transferibles dentro de IMPLACOST.

Componente	Resultado esperado	Horizonte dentro de IMPLACOST	Criterio de éxito
Inventario y áreas piloto	Mapa/inventario armonizado y red de sitios priorizados	Inicio	Cobertura de los principales contextos ecológicos y disponibilidad de metadatos
Protocolo común	Manual operativo de muestreo, laboratorio y cálculo	Inicio–medio	Mismas variables mínimas y unidades en todos los socios participantes
Intercalibración	Relaciones locales entre LOI/WB y CHN; control de calidad	Medio	Sesgos y rangos de incertidumbre documentados
Base regional de datos	Estructura común de datos y metadatos	Medio–final	Resultados trazables, comparables y reutilizables
Módulo de carbono costero	Integración piloto de stocks con sistema del CO_2 en sitios seleccionados	Medio–final	Interpretación conjunta de almacenamiento y procesos sin mezclar escalas temporales
Transferencia y continuidad	Capacitación, documentación y hoja de ruta postproyecto	Final	Capacidad de repetir el seguimiento tras la finalización de IMPLACOST

Este marco permite aprovechar la asimetría regional como un recurso de cooperación. Los territorios con mayor experiencia pueden apoyar el diseño, la intercalibración y la formación, mientras que los territorios con menor disponibilidad de datos amplían la representatividad ecológica y permiten probar la transferibilidad de los protocolos. El objetivo final no es homogeneizar los ecosistemas, sino homogeneizar la calidad y trazabilidad de la información necesaria para compararlos.

Los resultados recientes sobre la dinámica del CO_2 en aguas costeras de Canarias refuerzan la conveniencia de una aproximación por capas: un núcleo regional centrado en stocks sedimentarios comparables y módulos avanzados de procesos en sitios seleccionados. Esta estrategia evita que la mayor complejidad instrumental del sistema del CO_2 se convierta en una barrera para la participación regional, al tiempo que conserva la posibilidad de avanzar hacia presupuestos de carbono costero más completos.

5. Conclusiones y recomendaciones

La revisión confirma el papel estratégico de los ecosistemas costeros como reservorios de carbono y proveedores de servicios relevantes para la resiliencia litoral. También muestra que la principal limitación actual para una lectura regional no es la ausencia total de conocimiento, sino su heterogeneidad: los territorios disponen de tipos de datos, capacidades y niveles de desarrollo

metodológico distintos, y no existe todavía una base sistemática y plenamente comparable a escala MAC.

Canarias concentra la mayor parte de los estudios descritos para la Macaronesia, especialmente en praderas de *Cymodocea nodosa*, mientras que Madeira y Azores presentan una base más centrada en hábitats y biodiversidad. En los casos africanos desarrollados, Cabo Verde y Santo Tomé y Príncipe representan contextos muy diferentes en extensión de hábitats, disponibilidad de información y necesidades de seguimiento. La ausencia de un caso específico de Ghana en el documento actual debe quedar registrada como un vacío del diagnóstico y no como una conclusión sobre su potencial de carbono azul.

Los métodos disponibles permiten construir un programa regional realista. LOI y Walkley–Black ofrecen opciones accesibles para aumentar cobertura, mientras que CHN puede utilizarse como método de referencia para calibración y validación. La combinación de estas técnicas, acompañada de un protocolo común y ejercicios de intercomparación, puede equilibrar costes, precisión y disponibilidad de infraestructura sin renunciar a la calidad científica.

La evaluación de carbono azul debe mantener una distinción clara entre stocks de largo plazo y flujos de corto plazo. Los sedimentos y la biomasa son esenciales para estimar almacenamiento, pero la función climática de las plataformas costeras insulares también depende del intercambio aire–mar, la producción biológica, la remineralización y el transporte lateral. En consecuencia, las observaciones del sistema del CO_2 deben incorporarse de forma complementaria y progresiva en aquellos sitios donde aporten valor al objetivo de investigación y exista capacidad para sostenerlas.

Recomendaciones finales
• Adoptar antes del muestreo extensivo un protocolo mínimo común para diseño de campo, tratamiento de muestras, variables obligatorias, unidades y metadatos.
• Definir una red de áreas piloto que represente la diversidad ambiental del espacio MAC y no únicamente los territorios con mayor disponibilidad previa de información.
• Aplicar una estrategia analítica escalonada, con CHN como referencia de calibración y métodos más accesibles para aumentar cobertura cuando resulte apropiado.
• Establecer intercalibraciones entre laboratorios y documentar incertidumbres para que las diferencias entre territorios puedan interpretarse como diferencias ambientales y no como artefactos metodológicos.
• Completar los vacíos territoriales del diagnóstico, incluido el caso de Ghana señalado en el alcance del documento, pero no desarrollado en la revisión actual.
• Construir una base regional de datos y una hoja de ruta de seguimiento que puedan mantenerse después de IMPLACOST, convirtiendo el proyecto en una plataforma de cooperación científica y técnica a largo plazo.

Por lo tanto, IMPLACOST representa una oportunidad para pasar de estudios puntuales y metodologías heterogéneas a un sistema cooperativo de observación del carbono azul y, progresivamente, del carbono costero en la región MAC. El legado más valioso del proyecto sería un marco transferible, trazable y sostenible que permita generar nuevos datos con criterios

comunes, comparar territorios y apoyar futuras actuaciones de conservación, restauración y adaptación al cambio climático.

Bibliografía

Afonso-Carrillo, J., & Gil-Rodríguez, M. (1980). *Cymodocea nodosa* (Ucria) Ascherson (Zannichelliaceae) y las praderas submarinas o sebadales de las Islas Canarias. Vieraea: Folia scientiarum biologicarum canariensium, 8, 365–376.

Alberto, F., Massa, S., Manent, P., Díaz-Almela, E., Arnaud-Haond, S., Duarte, C. M., & Serrão, E. A. (2008). Genetic differentiation and secondary contact zone in the seagrass *Cymodocea nodosa* across the Mediterranean–Atlantic transition region. Journal of Biogeography, 35, 1279–1294. https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2007.01876.x

Alexandre, A., Silva, J., Ferreira, R., Paulo, D., Serrão, E. A., & Santos, R. (2017). First description of seagrass distribution and abundance in São Tomé and Príncipe. Aquatic Botany, 142, 48–52. https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2017.06.008

Andrade, A. B., Machado, L. F., Barreiros, J. P., Paulay, G., & Cardigos, F. (2008). In situ observation of sexual reproduction of *Holothuria tubulosa* Gmelin, 1788 (Echinodermata: Holothuroidea) in the Azores (NE Atlantic). SPC Beche-de-Mer Information Bulletin, 27, 43–45. http://hdl.handle.net/10400.3/1599

Bañolas, G., Fernández, S., Espino, F., Haroun, R., & Tuya, F. (2020). Evaluation of carbon sinks by the seagrass *Cymodocea nodosa* at an oceanic island: Spatial variation and economic valuation. Ocean & Coastal Management, 187, 105112. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2020.105112

Ben-Dor, E., & Banin, A. (1989). Determination of organic matter content in arid-zone soils using a simple "loss-on-ignition" method. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 20(15–16), 1675–1695. https://doi.org/10.1080/00103628909368175

Bindoff, N. L., Cheung, W. W. L., Kairo, J. G., Arístegui, J., Guinder, V. A., Hallberg, R., Hilmi, N., Jiao, N., Karim, M. S., Levin, L., O'Donoghue, S., Purca Cuicapusa, S. R., Rinkevich, B., Suga, T., Tagliabue, A., & Williamson, P. (2019). Changing ocean, marine ecosystems, and dependent communities. In H.-O. Pörtner et al. (Eds.), IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate (In press).

Brito Castro, M. D. C. (1999). Estudio de las comunidades intersticiales del sebadal (*Cymodocea nodosa*) en Canarias, con especial referencia a los anélidos poliquetos [Doctoral dissertation, Universidad de La Laguna].

Charles, M. J., & Simmons, M. S. (1986). Methods for the determination of organic carbon: A review. Analyst, 111(3), 385–393. https://doi.org/10.1039/AN9861100385

Creed, J. C., Engelen, A. H., D'Oliveira, E. C., et al. (2016). First record of seagrass in Cape Verde, eastern Atlantic. Marine Biodiversity Records, 9, 57. https://doi.org/10.1186/s41200-016-0067-9

Cunha, A. H., Assis, J. F., & Serrão, E. A. (2013). Seagrasses in Portugal: A most endangered marine habitat. Aquatic Botany, 104, 193–203. https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2011.08.007

Curbelo-Hernández, D., González-Dávila, M., González, A. G., González-Santana, D., & Santana-Casiano, J. M. (2021). CO_2 fluxes in the Northeast Atlantic Ocean based on measurements from a surface ocean observation platform. Science of The Total Environment, 775, 145804. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145804

Curbelo-Hernández, D., González-Dávila, M., & Santana-Casiano, J. M. (2023). The carbonate system and air-sea CO_2 fluxes in coastal and open-ocean waters of the Macaronesia. Frontiers in Marine Science, 10, 1094250. https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1094250

Fourqurean, J. W., Duarte, C. M., Kennedy, H., Marbà, N., Holmer, M., Mateo, M. A., ... & Serrano, O. (2012). Seagrass ecosystems as a globally significant carbon stock. Nature Geoscience, 5, 505–509. https://doi.org/10.1038/ngeo1477

González, A. G., Aldrich-Rodríguez, A., González-Santana, D., González-Dávila, M., & Santana-Casiano, J. M. (2024). Seasonal variability of coastal pH and CO_2 using an oceanographic buoy in the Canary Islands. Frontiers in Marine Science, 11, 1337929. https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1337929

Haroun, R., Herrero Barrencua, A., & Abreu, A. D. (2018). Mangrove habitats in São Tomé and Príncipe (Gulf of Guinea, Africa): Conservation and management status. In C. Makowski & C. Finkl (Eds.), Threats to Mangrove Forests (Coastal Research Library, Vol. 25, pp. 427–447). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-73016-5_27

Heiri, O., Lotter, A. F., & Lemcke, G. (2001). Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: Reproducibility and comparability of results. Journal of Paleolimnology, 25, 101–110. https://doi.org/10.1023/A:1008119611481

Hilmi, N., Chami, R., Sutherland, M. D., Hall-Spencer, J. M., Lebleu, L., Benitez, M. B., & Levin, L. A. (2021). The role of blue carbon in climate change mitigation and carbon stock conservation. Frontiers in Climate, 3, 710546. https://doi.org/10.3389/fclim.2021.710546

Howard, J., Hoyt, S., Isensee, K., Telszewski, M., & Pidgeon, E. (Eds.). (2014). Coastal blue carbon: Methods for assessing carbon stocks and emissions factors in mangroves, tidal salt marshes, and seagrasses (180 p.). Conservation International; Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO; International Union for Conservation of Nature.

Jackson, M. L. (1958). Soil chemical analysis. Prentice-Hall.

Lovelock, C. E., & Reef, R. (2020). Variable impacts of climate change on blue carbon. One Earth, 3(2), 195–211. https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.08.010

Martins, G. M., Hipólito, C., Parreira, F., Prestes, A. C. L., Dionísio, M. A., Azevedo, J. M. N., & Neto, A. I. (2016). Differences in the structure and functioning of two communities: Frondose and turf-forming macroalgal dominated habitats. Marine Environmental Research, 116, 71–77. https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2016.03.004

Mbatha, A., Kairo, J., Njoroge, G., et al. (2025). Characteristics of mangrove forests in São Tomé and Príncipe and the potential for restoration [Preprint]. Research Square. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-7473521/v1

Montero-Hidalgo, M., Tuya, F., Otero-Ferrer, F., Haroun, R., & Santos-Martín, F. (2023). Mapping and assessing seagrass meadows changes and blue carbon under past, current, and future scenarios. Science of The Total Environment, 872, 162244.

Nelson, D. W., & Sommers, L. E. (1996). Total carbon, organic carbon, and organic matter. In D. L. Sparks (Ed.), Methods of soil analysis: Part 3—Chemical methods (pp. 961–1010). Soil Science Society of America.

Pavón-Salas, N., Herrera, R., Hernández-Guerra, A., & Haroun, R. (2000). Distributional pattern of seagrasses in the Canary Islands (Central-East Atlantic Ocean). Journal of Coastal Research, 16(2), 329–335. http://www.jstor.org/stable/4300041

Plan Vivo Standard 5.0. Plan Vivo. Accessed January 28, 2026. https://www.planvivo.org/standard-documents.

Pribyl, D. W. (2010). A critical review of the conventional SOC to SOM conversion factor. Geoderma, 156(3–4), 75–83. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.02.003

Ratefinjanahary, I., MacKenzie, R., Sharma, S., Razakamanarivo, H., Razafintsalama, V., Ravelosamiariniriana, K., ... Ramifehiarivo, N. (2025). Development of soil organic carbon quantification model and comparison based on CHN analyser, loss on ignition, and Walkley–Black methods for mangrove soils in Madagascar. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 309, 109182. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2025.109182

Reyes, J., Sansón, M., & Afonso-Carrillo, J. (1995). Distribution and reproductive phenology of the seagrass *Cymodocea nodosa* (Ucria) Ascherson in the Canary Islands. Aquatic Botany, 50, 171–180.

Saenger, P., & Bellan, M. F. (1995). The mangrove vegetation of the Atlantic coast of Africa: A review. Université de Toulouse, Toulouse, France.

Salehi, M. H., Hashemi Beni, O., Beigi Harchegani, H., Esfandiarpour Borujeni, I., & Motaghian, H. R. (2011). Refining soil organic matter determination by loss-on-ignition. Pedosphere, 21(4), 473–482. https://doi.org/10.1016/S1002-0160(11)60149-5

Sánchez-Mendoza, I., González-Dávila, M., González-Santana, D., Curbelo-Hernández, D., Estupiñán-Santana, D., González, A. G., & Santana-Casiano, J. M. (2026). Modelling seawater pCO_2 and pH in the Canary Islands region based on satellite measurements and machine learning techniques. Ocean Science, 22, 609–628. https://doi.org/10.5194/os-22-609-2026

Tuya, F., Ribeiro-Leite, L., Arto-Cuesta, N., Coca, J., Haroun, R., & Espino, F. (2014). Decadal changes in the structure of *Cymodocea nodosa* seagrass meadows: Natural vs. human influences. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 137, 41–49.

UICN. (2021). Manual para la creación de proyectos de carbono azul en Europa y en el Mediterráneo (M. Otero, Ed.). UICN. 144 pp.

UNEP-WCMC. (2026). Ocean+ Habitats: Cabo Verde and São Tomé and Príncipe [Online]. Retrieved January 30, 2026, from https://habitats.oceanplus.org

United Nations Environment Programme (UNEP). (2020). Out of the blue: The value of seagrasses to the environment and to people. Nairobi: UNEP. https://www.unep.org/resources/report/out-blue-value-seagrasses-environment-and-people

Verified Carbon Standard. Verra. Accessed January 28, 2026. https://verra.org/project/vcs-program/.

Walkley, A. (1947). A critical examination of a rapid method for determining organic carbon in soils: Effect of variations in digestion conditions and of inorganic soil constituents. Soil Science, 63(4), 251–264. https://doi.org/10.1097/00010694-194704000-00001

Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Science, 37, 29–38.

Wang, X., Wang, J., & Zhang, J. (2012). Comparisons of three methods for organic and inorganic carbon in calcareous soils of northwestern China. PLoS ONE, 7(8), e44334. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0044334

Wildpret de la Torre, W., & Del Arco Aguilar, M. J. (1987). España insular: Las Canarias. En V. Peinado & S. Rivas-Martínez (Eds.), La vegetación de España (pp. 515–544). Servicio de Publicaciones, Universidad de Alcalá de Henares.

Wirtz, P. (1995). One vascular plant and ten invertebrate species new to the marine flora and fauna of Madeira. Arquipélago. Life and Marine Sciences, 13A, 119–123. http://hdl.handle.net/10400.3/2119

Yamuza-Magdaleno, A., Jiménez-Ramos, R., Casal-Porras, I., Brun, F. G., & Egea, L. G. (2024). Long-term sediment organic carbon remineralization in different seagrass and macroalgae habitats: Implication for blue carbon storage. Frontiers in Marine Science, 11, 1370768. https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1370768

Zittis, G., Zoumides, C., Zemah-Shamir, S., et al. (2025). Insular ecosystem services in peril: A systematic review on the impacts of climate change and other drivers. Climatic Change, 178, 127. https://doi.org/10.1007/s10584-025-03961-0