



FACULTAD DE CIENCIAS DE LA VIDA Y TECNOLOGIAS

CARRERA DE BIOLOGÍA

TRABAJO DE INTEGRACION CURRICULAR

Modalidad: Artículo Académico

Tema:

CONCENTRACIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO EN LA BIOMASA
CALCÁREA DE *Anadara tuberculosa*

Autores:

Nelson Ramón Antón-Arroyo & Jonathan Israel Moreno-Macías

Tutor:

Blgo. Darío Olivio Del Valle Calderon

Periodo 2025 – 2

Declaración de Autoría

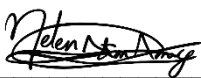
Nosotros, Antón Arroyo Nelson Ramón y Moreno Macías Jonathan Israel declaramos que hemos contribuido a la realización del trabajo de titulación bajo la modalidad de Artículo Académico previo a la obtención del título de Biólogo/a, con el tema:

Concentración de Dióxido de Carbono en la Biomasa Calcárea de *Anadara tuberculosa*

Hemos revisado la versión final del manuscrito y aprobamos su presentación para su publicación. También garantizamos que este trabajo es original, no ha sido publicado previamente y no está bajo consideración para su publicación en otro lugar.

Además, declaramos que no tenemos conflictos de interés en relación con este trabajo.

Firmas:



Antón Arroyo Nelson Ramón

CI: 0804563823



Moreno Macías Jonathan Israel

CI: 1720881935

	NOMBRE DEL DOCUMENTO: CERTIFICADO DE TUTOR(A).	CÓDIGO: PAT-04-F-004
	PROCEDIMIENTO: TITULACIÓN DE ESTUDIANTES DE GRADO BAJO LA UNIDAD DE INTEGRACIÓN CURRICULAR	REVISIÓN: 1
		Página 1 de 1

CERTIFICACIÓN

En calidad de docente tutor(a) **DEL VALLE**
CALDERÓN DARÍO OLIVIO de la Facultad Ciencias de la Vida y Tecnología de la
carrera de Biología de la Universidad Laica "Eloy Alfaro", CERTIFICO:

Haber dirigido, revisado y aprobado preliminarmente el Trabajo de Integración
Curricular bajo la autoría de los estudiantes **Anton Arroyo Nelson Ramon,**
Moreno Macías Jonathan Israel legalmente matriculados en la carrera de
Biología, período académico 2025 (2), cumpliendo el total de **384** horas, cuyo
tema del proyecto es "**CONCENTRACIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO EN LA BIOMASA**
CALCÁREA EN ANADARA TUBERCULOSA"

La presente investigación ha sido desarrollada en apego al cumplimiento de los
requisitos académicos exigidos por el Reglamento de Régimen Académico y en
concordancia con los lineamientos internos de la opción de titulación en mención,
reuniendo y cumpliendo con los méritos académicos, científicos y formales, y la
originalidad del mismo, requisitos suficientes para ser sometida a la evaluación del
tribunal de titulación que designe la autoridad competente.

Particular que certifico para los fines consiguientes, salvo disposición de Ley en
contrario.

Manta, 02 de Febrero 2026.

Lo certifico,



Blgo. Darío Olivio del Valle Calderón, Mg C.A.
Docente Tutor(a)
Área: Ecología y medio ambiente

AGRADECIMIENTOS

Agradezco, en primer lugar, a Dios, por concederme la fortaleza, la salud y la sabiduría necesarias para culminar esta etapa trascendental de mi vida, así como por guiarme en los momentos de dificultad y sostenerme con su protección constante a lo largo de este proceso. Expreso mi más profundo agradecimiento a mi madre, quien ha sido mi principal ejemplo de esfuerzo, amor y perseverancia. Gracias por confiar en mí incluso en los momentos de duda, por su apoyo incondicional y por cada sacrificio realizado para hacer posible la consecución de este logro.

A mi hermano, le agradezco sinceramente por su presencia permanente, su respaldo constante y por constituir un pilar fundamental tanto en mi desarrollo personal como académico. Agradezco a mis amigos, quienes me acompañaron durante este proceso formativo, brindándome ánimo, apoyo y valiosos momentos de alegría que contribuyeron a hacer más llevadero y significativo este camino.

- ***Jonathan Israel Moreno Macías***

Deseo expresar mi sincero agradecimiento, en primer lugar, a mi familia, quienes me brindaron la oportunidad y el apoyo necesarios para iniciar y culminar mis estudios con éxito. De manera especial, agradezco a mi madre, quien permaneció a mi lado en todo momento, sin importar las circunstancias, brindándome su amor, respaldo y apoyo incondicional a lo largo de este proceso formativo. De igual manera, expreso mi gratitud a mis compañeros de estudio, en particular a Jonathan Moreno, con quien inicié esta carrera en un marco de compañerismo y hermandad, así como a Alexis Ledesma, quien me brindó su apoyo constante tanto en el ámbito académico como en el personal.

Al último, pero no menos importante, agradezco a todos y cada uno de los docentes de la carrera, quienes, con su conocimiento, dedicación y paciencia, contribuyeron de manera significativa a mi formación profesional. De forma especial, extendiendo mi reconocimiento al Biólogo Darío del Valle y al Biólogo Luis Bravo, ya que, gracias a sus orientaciones y valiosas enseñanzas, fue posible llevar a cabo el proceso de desarrollo del proyecto y culminarlo exitosamente.

- ***Nelson Ramón Antón Arroyo***

Dedicatoria

Dedico este trabajo, en primer lugar, a Dios, por iluminar mi camino, brindarme fortaleza en los momentos de dificultad y permitirme alcanzar una de las metas más importantes de mi formación profesional.

A mi madre, con profundo amor y gratitud, por ser el motor que impulsa cada uno de mis sueños, por su esfuerzo incansable, sus sacrificios, su confianza incondicional y por enseñarme, con su ejemplo, el valor de la perseverancia y la dedicación. Este logro también le pertenece a ella, pues su apoyo fue fundamental para hacerlo posible. A mi hermano, por acompañarme en cada etapa de este proceso, por su respaldo constante y por constituir una fuente de motivación para seguir adelante aun en los momentos más complejos.

Dedico este logro a mis amigos, quienes compartieron conmigo experiencias, aprendizajes y momentos significativos que enriquecieron mi vida personal y académica, convirtiéndose en un apoyo invaluable durante mi formación universitaria.

Finalmente, dedico este trabajo a todas aquellas personas que creyeron en mí y contribuyeron, de una u otra manera, al cumplimiento de este importante objetivo profesional.

- ***Jonathan Israel Moreno Macías***

Dedico este trabajo, en primer lugar, a mi familia, por ser el fundamento de mis valores, mis principios y mi formación personal. Gracias por brindarme el apoyo y la oportunidad de alcanzar esta meta académica que hoy representa un importante paso en mi vida profesional.

De manera especial, dedico este logro a mi madre, quien ha sido mi mayor inspiración y fortaleza. Gracias por acompañarme en cada etapa de este camino, por su amor incondicional, su confianza permanente y por motivarme a continuar adelante incluso en los momentos más difíciles. Su apoyo ha sido esencial para la culminación de esta importante meta.

Dedico este trabajo a mis compañeros y amigos, especialmente a Jonathan Moreno, con quien compartí el inicio y desarrollo de esta carrera universitaria en un ambiente de compañerismo, respeto y hermandad, y a Alexis Ledesma, por su constante apoyo, amistad y colaboración tanto en el ámbito académico como en el personal.

Finalmente, dedico este logro a todos los docentes que formaron parte de mi proceso educativo, en especial al Biólogo Darío del Valle y al Biólogo Luis Bravo, cuyas enseñanzas, orientaciones y conocimientos contribuyeron significativamente a mi crecimiento profesional y al desarrollo exitoso de este proyecto de investigación.

- Nelson Ramón Antón Arroyo

CONCENTRACIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO EN LA BIOMASA CALCÁREA DE *Anadara tuberculosa*

Nelson Ramón Antón-Arroyo¹, Jonathan Israel Moreno-Macías², Dario Del Valle¹.¹ Carrera de Biología, Facultad de Ciencias de la vida y Tecnologías, Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí. Correo institucional: e0804563823@live.uleam.edu.ec² Carrera de Biología, Facultad de Ciencias de la vida y Tecnologías, Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí. Correo institucional: e1720881935@live.uleam.edu.ec¹ Carrera de Biología, Facultad de Ciencias de la vida y Tecnologías, Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí. Correo institucional: dario.delvalle@uleam.edu.ec

RESUMEN

El dióxido de carbono (CO₂) es un componente clave del ciclo biogeoquímico del carbono en ecosistemas costeros, donde los organismos calcificadores participan activamente mediante procesos de biomineralización y descomposición del carbonato de calcio. El presente estudio tuvo como objetivo determinar la cantidad de dióxido de carbono asociada a la biomasa calcárea de *Anadara tuberculosa* como indicador de la dinámica del carbono inorgánico en manglares de Esmeraldas durante el año 2025. La investigación se desarrolló bajo un enfoque práctico y experimental, analizando 600 valvas provenientes de 300 individuos silvestre-comerciales, a las cuales se les registraron parámetros morfológicos y se sometieron a un procedimiento químico controlado para la descomposición del carbonato de calcio mediante ácido nítrico. El CO₂ liberado fue capturado y cuantificado a través de un sistema cerrado de desplazamiento de volumen, permitiendo su conversión a unidades molares y gravimétricas. Los resultados evidenciaron una relación directa entre la masa de la biomasa calcárea disuelta y la cantidad de dióxido de carbono liberado, lo que confirma que *Anadara tuberculosa* constituye un reservorio relevante de carbono inorgánico. Estos hallazgos aportan información científica significativa para la comprensión del ciclo del carbono en ecosistemas de manglar y para el análisis ambiental del aprovechamiento sostenible de recursos bentónicos en un contexto de cambio climático.

Palabras claves: *Anadara tuberculosa*; biomasa calcárea; dióxido de carbono; carbonato de calcio; ciclo del carbono; biomineralización.

Abstract

Carbon dioxide (CO₂) is a key component of the biogeochemical carbon cycle in coastal ecosystems, where calcifying organisms actively participate through biomineralization and calcium carbonate decomposition processes. This study aimed to determine the amount of carbon dioxide associated with the calcareous biomass of *Anadara tuberculosa* as an indicator of inorganic carbon dynamics in mangroves of Esmeraldas during the year 2025. The research was conducted using a practical and experimental approach, analyzing 600 valves from 300 wild-caught and commercially cultivated individuals. Morphological parameters were recorded, and the valves were subjected to a controlled chemical procedure for calcium carbonate decomposition using nitric acid. The released

CO₂ was captured and quantified using a closed volume displacement system, allowing its conversion to molar and gravimetric units. The results showed a direct relationship between the mass of dissolved calcareous biomass and the amount of carbon dioxide released, confirming that *Anadara tuberculosa* constitutes a significant reservoir of inorganic carbon. These findings provide significant scientific information for understanding the carbon cycle in mangrove ecosystems and for the environmental analysis of the sustainable use of benthic resources in the context of climate change.

Key words: *Anadara tuberculosa*; calcareous biomass; carbon dioxide; calcium carbonate; carbon cycle; biomineralization.

1 INTRODUCCIÓN

El dióxido de carbono (CO₂) es uno de los principales gases involucrados en la regulación climática global y su dinámica en los ecosistemas marinos constituye un componente clave del ciclo biogeoquímico del carbono. En las últimas décadas, los ecosistemas costeros han adquirido especial relevancia debido a su capacidad para almacenar y transformar carbono, destacándose los manglares, estuarios y zonas intermareales como espacios de alta productividad biológica y complejidad ecológica (Gattuso et al., 2018; Macreadie et al., 2019). Estos sistemas no solo actúan como importantes sumideros de carbono orgánico, sino que también participan activamente en el ciclo del carbono inorgánico a través de procesos físicos, químicos y biológicos que influyen en la concentración y liberación de CO₂.

Dentro de este contexto, los organismos calcificadores marinos, particularmente los bivalvos, desempeñan un papel fundamental debido a su capacidad para formar estructuras carbonatadas mediante el proceso de biomineralización. La formación de conchas a partir de carbonato de calcio (CaCO₃) implica reacciones químicas estrechamente vinculadas al equilibrio del carbono inorgánico disuelto, proceso que puede generar la liberación de CO₂ al medio marino. Diversos estudios han señalado que, bajo determinadas condiciones ambientales, la calcificación puede convertir a los bivalvos en fuentes netas de CO₂, mientras que en otros escenarios estos organismos pueden contribuir al almacenamiento de carbono en forma mineral, generando un debate científico en torno a su rol como sumideros o emisores de carbono (Waldbusser et al., 2016; Frankignoulle et al., 2017; Filgueira et al., 2020).

La mayor parte de la evidencia disponible sobre la dinámica del carbono asociada a la calcificación en bivalvos proviene de especies de regiones templadas o de sistemas de acuicultura intensiva, como *Crassostrea gigas* y *Mytilus galloprovincialis*, en las cuales se ha demostrado que factores como la temperatura, la química del carbonato, la

disponibilidad de nutrientes y las tasas de crecimiento influyen significativamente en la liberación de CO₂ durante la formación de las conchas (Parker et al., 2018; Humphreys et al., 2018). Sin embargo, existe una marcada escasez de información sobre especies tropicales que habitan ecosistemas de manglar, lo que limita la comprensión del balance real de carbono en estos sistemas altamente productivos y vulnerables al cambio climático.

En este sentido, *Anadara tuberculosa*, conocida comúnmente como concha prieta, constituye una especie de gran interés biológico, ambiental y socioeconómico en los manglares del Pacífico oriental tropical. Este bivalvo se desarrolla de manera natural en sedimentos fangosos de manglar, donde cumple funciones ecológicas esenciales como organismo filtrador, contribuyendo a la regulación de la calidad del agua, al reciclaje de nutrientes y a la dinámica de partículas en suspensión (Flores et al., 2021; Trejos Pimentel, 2024). Además, su aprovechamiento silvestre-comercial representa una fuente significativa de ingresos y seguridad alimentaria para numerosas comunidades costeras de Ecuador, particularmente en provincias como Manabí.

Desde una perspectiva estructural y química, la concha de *A. tuberculosa* está constituida principalmente por carbonato de calcio, acompañado de una matriz orgánica que incluye proteínas estructurales, lípidos y compuestos nitrogenados. Estudios sobre la composición química y proximal de esta especie han evidenciado la presencia de componentes nutricionales y elementos traza que influyen tanto en la resistencia mecánica de la concha como en su comportamiento frente a procesos de disolución y descomposición (Cruz-Soto et al., 2012; Vincés et al., 2024). Estas características convierten a la biomasa calcárea en un reservorio potencial de carbono inorgánico, cuya cuantificación resulta esencial para evaluar su contribución al ciclo del carbono en ecosistemas de manglar.

El análisis químico de la biomasa calcárea, particularmente mediante técnicas cromatográficas y métodos de cuantificación indirecta del CO₂, se ha consolidado como una herramienta fundamental para estimar la cantidad de dióxido de carbono asociada a estructuras carbonatadas. Estas metodologías permiten evaluar con mayor precisión la liberación de CO₂ durante procesos de descomposición del CaCO₃, aportando información clave para el análisis del balance de carbono a escala local y regional (Millero, 2019; Simpson et al., 2024). No obstante, en el caso de *Anadara tuberculosa*, los estudios que integran análisis cromatográficos, composición química de la concha y una perspectiva ambiental siguen siendo limitados, especialmente en ecosistemas tropicales.

En el contexto local, los manglares de Esmeraldas, en la costa del Ecuador, constituyen ecosistemas estratégicos por su alta biodiversidad y su capacidad para

almacenar carbono azul. Durante el año 2025, la extracción silvestre-comercial de *A. tuberculosa* en esta zona se desarrolló en un escenario marcado por presiones ambientales, cambios en el uso del suelo y efectos asociados al cambio climático, lo que resalta la necesidad de generar información científica que permita evaluar de manera integral el impacto ecológico de esta actividad (Ichazo Ortega & Sanguña Soliz, 2020; Macreadie et al., 2019). En este marco, resulta fundamental determinar la concentración de dióxido de carbono presente en la biomasa calcárea de esta especie y analizar cómo sus características químicas, nutricionales y estructurales influyen en la dinámica del carbono inorgánico en los manglares.

Bajo este contexto, el presente estudio se orienta a determinar la concentración de dióxido de carbono presente en la biomasa calcárea de *Anadara tuberculosa* recolectada en los manglares de Esmeraldas, durante el año 2025, mediante el análisis químico y cromatográfico de sus valvas, con el propósito de evaluar su papel ambiental dentro del ciclo del carbono en ecosistemas de manglar. De manera complementaria, se busca analizar la composición química y los componentes nutricionales de la concha asociados a la fijación de carbono inorgánico, cuantificar la liberación de CO₂ derivada de la descomposición de la biomasa calcárea y valorar la relevancia ambiental y comercial de esta especie en relación con su contribución al balance de carbono, aportando evidencia científica que respalde estrategias de manejo sostenible y conservación de los manglares en el contexto del cambio climático.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación corresponde a un estudio de tipo práctico y experimental, orientado a la cuantificación del dióxido de carbono asociado a la biomasa calcárea de *Anadara tuberculosa* mediante procedimientos controlados de laboratorio. El diseño experimental se fundamentó en la aplicación de técnicas químicas y analíticas para la descomposición del carbonato de calcio presente en las valvas, permitiendo la liberación, captura y posterior estimación del CO₂ generado. El estudio se desarrolló bajo condiciones controladas, utilizando muestras provenientes de una población silvestre-comercial recolectada en el sector comercial de Playita Mía del cantón Manta, provincia de Manabí, durante el año 2025, con el propósito de garantizar la reproducibilidad de los resultados y su validez científica en el análisis del ciclo del carbono en ecosistemas de manglar.

2.1 Preparación de materiales de laboratorio

La preparación de los materiales de laboratorio se orientó a la implementación de un sistema experimental cerrado para la separación, conducción y medición del dióxido de carbono generado durante la reacción química entre la biomasa calcárea de *Anadara tuberculosa* y el agente ácido. Para ello, se emplearon cuatro buretas de 1000 mL, cuatro peceras pequeñas, cuatro mangueras de silicona de 1,5 m de longitud, cuatro frascos de vidrio con capacidad de 1 L y cuatro pinzas de tres dedos acopladas a soportes universales, garantizando la repetibilidad del procedimiento experimental mediante el uso de montajes paralelos.

Los frascos de vidrio fueron destinados a contener las valvas y la solución ácida responsable de la descomposición del carbonato de calcio. En cada tapa se realizó una perforación central que permitió la inserción de un extremo de la manguera de silicona, la cual fue sellada de manera hermética utilizando silicona caliente, con el fin de evitar fugas de gas y asegurar que el dióxido de carbono producido fuera conducido exclusivamente a través del sistema. Este sellado resultó fundamental para mantener condiciones controladas durante la liberación del CO₂.

Las peceras se llenaron aproximadamente hasta la mitad con agua a temperatura ambiente y funcionaron como reservorios para el desplazamiento del volumen de agua durante la medición del gas. Sobre cada pecera se instaló un soporte universal equipado con una pinza de tres dedos, la cual sostuvo una bureta colocada en posición invertida y completamente llena de agua, evitando la presencia de burbujas de aire al inicio del experimento. El extremo libre de la manguera de silicona se introdujo por la parte inferior de la bureta, permitiendo que el dióxido de carbono generado durante la reacción química ingresara al interior de esta y desplazara progresivamente el agua contenida.

Este método de desplazamiento de volumen permitió cuantificar de manera indirecta el dióxido de carbono liberado, ya que el volumen de agua desplazado desde la bureta hacia la pecera fue equivalente al volumen de CO₂ producido. La configuración del sistema aseguró una medición precisa y controlada del gas generado, constituyéndose como una técnica adecuada para la estimación experimental del dióxido de carbono asociado a la biomasa calcárea analizada.



Imagen 1. Elaboración y armado del equipo de experimentación.

2.2 Recolección y preparación de la muestra

La recolección de las muestras se realizó a partir de una población silvestre-comercial de *Anadara tuberculosa* proveniente del sector comercial de Playita Mía, en el cantón Manta. Se seleccionaron un total de 300 individuos, de los cuales se extrajeron ambas valvas, obteniéndose un total de 600 valvas para el análisis experimental. Esta estrategia permitió garantizar una representación adecuada de la biomasa calcárea individual y reducir sesgos asociados a variaciones morfológicas entre especímenes.

Una vez recolectadas, las valvas fueron sometidas a un proceso de limpieza manual con el fin de eliminar completamente cualquier resto de tejido orgánico, sedimentos o material adherido a la superficie de la concha. Para ello, se utilizó agua limpia y cepillos de cerdas suaves, evitando el uso de agentes químicos que pudieran alterar la composición mineral del carbonato de calcio. Posteriormente, las valvas fueron dispuestas en un área ventilada, a temperatura ambiente, durante un período de 48 horas, permitiendo su secado natural. Este procedimiento tuvo como objetivo eliminar la humedad residual y prevenir interferencias en las mediciones posteriores, asegurando condiciones homogéneas y reproducibles para el análisis del dióxido de carbono asociado a la biomasa calcárea.



Imagen 2. Recolección de la muestra en el lugar de comercio.



Imagen 3. Limpieza de impurezas y restos orgánicos de la muestra.



Imagen 4. Proceso de secado natural de la muestra.



Imagen 5. Muestras secas después de 48 horas.

2.3 Toma de datos morfológicos

La toma de datos morfológicos se realizó de manera individual para cada una de las valvas de *Anadara tuberculosa*, con el objetivo de caracterizar sus dimensiones físicas y establecer una relación entre la morfometría de la biomasa calcárea y la cantidad de dióxido de carbono liberado durante el análisis experimental. Para este procedimiento se empleó una balanza digital de precisión y un calibrador vernier, instrumentos que permitieron obtener mediciones exactas y reproducibles.

Una vez concluido el proceso de secado natural de las valvas durante un período de 48 horas, y previo a su colocación en el sistema experimental y al contacto con reactivos químicos, se procedió a registrar las variables morfológicas de cada muestra. Con el calibrador se midieron el largo, el ancho y el espesor de cada valva, expresados en milímetros, asegurando una correcta alineación del instrumento para minimizar errores de medición. Posteriormente, el peso de cada valva fue determinado utilizando la balanza digital, registrándose los valores en gramos (g).



Imagen 6. Toma de morfología de la muestra.

2.4 Procedimiento experimental de procesamiento y recolección del CO₂

Una vez finalizada la toma de datos morfológicos de cada valva, se procedió al procesamiento experimental para la liberación y recolección del dióxido de carbono asociado a la biomasa calcárea de *Anadara tuberculosa*. Para este fin, se preparó la solución reactiva destinada a la descomposición del carbonato de calcio, la cual consistió en una mezcla compuesta por 30 % de agua destilada y 70 % de ácido nítrico, preparada bajo condiciones controladas y siguiendo protocolos de seguridad para el manejo de reactivos corrosivos.

La solución reactiva fue transferida a los frascos de vidrio con capacidad de 1 L, previamente acondicionados como parte del sistema cerrado de captura de gases. Posteriormente, cada valva fue introducida de manera individual en el frasco correspondiente, asegurando que la muestra quedara completamente inmersa en la solución. De forma inmediata, el sistema fue sellado herméticamente para evitar cualquier fuga del dióxido de carbono generado durante la reacción química. Este sellado permitió garantizar que todo el gas liberado fuera conducido hacia el sistema de medición por desplazamiento de agua.

La reacción se mantuvo hasta la disolución completa de la biomasa calcárea, proceso mediante el cual el carbonato de calcio (CaCO_3) reaccionó con el ácido nítrico, liberando dióxido de carbono y quedando como residuo sólido únicamente el perióstraco de la valva. Una vez concluida la reacción y estabilizado el volumen de gas recolectado, se procedió a registrar la cantidad de CO_2 liberado, expresada como volumen desplazado, información que fue incorporada en la base de datos experimental correspondiente a cada muestra.

El perióstraco remanente fue cuidadosamente retirado, lavado y secado, y posteriormente pesado utilizando una balanza digital de precisión. Este procedimiento permitió obtener una estimación más exacta de la masa original de la biomasa calcárea disuelta, facilitando la relación entre el peso inicial de la valva, el residuo orgánico y la cantidad de dióxido de carbono liberado.



Imagen 7. Proceso de disolución de la muestra.

2.5 Análisis, procesamiento y cuantificación de datos

Una vez aplicado el procedimiento experimental a la totalidad de los ejemplares analizados, correspondientes a 300 individuos de *Anadara tuberculosa* y un total de 600 valvas, se procedió al registro sistemático de la información obtenida. Todos los datos experimentales y morfológicos fueron organizados en una hoja de cálculo digital (Microsoft Excel), lo que permitió una gestión ordenada, trazable y reproducible de los resultados generados durante el estudio.

En la base de datos se incluyeron, para cada valva analizada, las siguientes variables: largo (cm), ancho (cm), espesor (cm), peso individual (g), peso total por individuo (g), volumen de dióxido de carbono liberado expresado en mililitros (mL) y litros (L), cantidad de CO_2 en moles, masa de CO_2 en gramos (g), peso sobrante correspondiente al perióstraco (g), peso neto de la biomasa calcárea disuelta (g) y el promedio de CO_2 capturado de la atmósfera expresado en gramos (g). Cada una de estas variables fue calculada mediante las fórmulas químicas y matemáticas correspondientes, considerando las relaciones estequiométricas del carbonato de calcio y los principios del comportamiento de los gases.

El volumen de dióxido de carbono recolectado por desplazamiento de agua fue convertido a litros y posteriormente a moles de CO_2 , utilizando las condiciones estándar de presión y temperatura, lo que permitió calcular la masa de CO_2 liberada por cada valva. Estos valores fueron posteriormente relacionados con el peso neto de la biomasa

calcárea disuelta, obteniéndose indicadores cuantitativos que facilitaron el análisis comparativo entre muestras y la identificación de patrones asociados a la morfometría de las valvas.

Los datos individuales fueron agrupados y promediados para estimar la cantidad total de dióxido de carbono liberado por la población analizada. A partir de estos resultados, se realizó una extrapolación para expresar el aporte total de CO₂ en unidades de tonelada por población, proporcionando una estimación integral del dióxido de carbono asociado a la biomasa calcárea de *Anadara tuberculosa*. Este procesamiento permitió evaluar de manera cuantitativa el rol de esta especie dentro del ciclo del carbono en los ecosistemas de manglar, integrando los resultados experimentales en una escala poblacional con relevancia ambiental.

2.6 Análisis Estadístico

El análisis estadístico se realizó con el objetivo de evaluar la relación entre las características morfométricas de las valvas de *Anadara tuberculosa*, el peso total de la biomasa calcárea y la cantidad de dióxido de carbono liberado durante el proceso experimental, expresada a escala poblacional en unidades de tonelada (t). Previamente a los análisis inferenciales, los datos fueron organizados y depurados en Microsoft Excel, y posteriormente analizados mediante software estadístico, aplicando pruebas de normalidad, correlación y comparación de varianza bajo un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$.

Las pruebas de normalidad aplicadas a las variables cuantitativas indicaron que tanto las dimensiones morfométricas integradas (largo, ancho y espesor), como el peso total de la valva y la cantidad de CO₂ liberado, no se ajustaron a una distribución normal. Esta condición es consistente con lo esperado para poblaciones silvestres, donde la variabilidad estructural responde a factores biológicos y ambientales. En consecuencia, se priorizó el uso de pruebas no paramétricas para el análisis de asociación y comparación, complementadas con pruebas paramétricas robustas cuando fue metodológicamente pertinente.

El análisis de correlación evidenció una relación positiva, fuerte y estadísticamente significativa entre el conjunto morfométrico de las valvas y la cantidad de dióxido de carbono liberado. Al considerar las dimensiones de largo, ancho y espesor como un sistema integrado de talla estructural, se observó que el incremento conjunto de estas variables se asocia directamente con un aumento proporcional del CO₂ generado durante la descomposición del carbonato de calcio. Esta relación fue consistente tanto a

nivel individual como al extrapolar los datos a escala poblacional, lo que refuerza la validez del enfoque integrado de talla como indicador del contenido de biomasa calcárea.

De manera más específica, el peso total de la valva mostró la asociación más robusta con la cantidad de CO₂ liberado. A medida que el peso total aumentó, la cantidad de dióxido de carbono liberado se incrementó de forma casi proporcional, lo que se reflejó en una correlación monótona altamente significativa. Al convertir los valores acumulados de CO₂ a escala poblacional, los resultados indicaron liberaciones del orden de 10⁻³ a 10⁻² toneladas de CO₂, dependiendo del rango de peso total considerado, lo que demuestra que pequeñas variaciones en la biomasa calcárea individual pueden traducirse en diferencias apreciables cuando se analizan poblaciones completas.

Para evaluar si las diferencias observadas en la liberación de CO₂ respondían a variaciones estructurales reales, se realizó un análisis de varianza considerando grupos definidos a partir del peso total de la valva. Dado que las varianzas no fueron homogéneas, se aplicaron pruebas equivalentes robustas y no paramétricas, las cuales confirmaron la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre los grupos de mayor y menor peso. Los individuos con valvas de mayor peso total contribuyeron de manera desproporcionada a la liberación total de dióxido de carbono, alcanzando valores acumulados cercanos al orden de 10⁻² t de CO₂ a nivel poblacional, mientras que los grupos de menor peso aportaron cantidades significativamente inferiores, del orden de 10⁻³ t.

La coherencia entre los análisis de normalidad, correlación y varianza permite afirmar que la liberación de dióxido de carbono está estrechamente condicionada por la estructura morfométrica y el peso total de la biomasa calcárea, más que por variaciones aleatorias entre individuos. La consistencia de estas relaciones respalda la solidez estadística del modelo experimental aplicado y confirma que el peso total de la valva y el conjunto de tallas morfológicas constituyen variables explicativas clave para la estimación del CO₂ asociado a *Anadara tuberculosa*.

Pruebas de normalidad

La normalidad de las variables cuantitativas se evaluó mediante la prueba de Shapiro–Wilk, tal como se realiza en el artículo modelo, debido a su adecuada sensibilidad para tamaños muestrales moderados. Se analizaron tres variables principales: índice morfométrico de talla, peso total de la valva (g) y CO₂ liberado (t).

Tabla 1

Prueba de normalidad de Shapiro–Wilk para las variables analizadas

Variable	n	Estadístico W	p-valor
Índice morfométrico de talla	300	0.9659	1.59×10^{-6}
Peso total de la valva (g)	300	0.8669	2.06×10^{-15}
CO ₂ liberado (t)	300	0.8767	8.43×10^{-15}

Nota. Valores de $p < 0.05$ indican desviación significativa de la normalidad.

Los resultados evidencian que ninguna de las variables presenta distribución normal, por lo que se justifica el uso de pruebas no paramétricas para el análisis principal, complementadas con pruebas paramétricas robustas únicamente con fines comparativos.

Análisis de correlación

Con el fin de evaluar la relación entre la estructura de la valva y la liberación de CO₂, se realizó un análisis de correlación utilizando los coeficientes de Pearson (asociación lineal) y Spearman (asociación monótona). Las dimensiones morfométricas (largo, ancho y espesor) fueron integradas en un índice único de talla, permitiendo un análisis coherente del tamaño estructural total de la valva.

Tabla 2

Coeficientes de correlación entre las variables estructurales y el CO₂ liberado (t)

Variables relacionadas	r (Pearson)	p-valor	ρ (Spearman)	p-valor
Índice de talla – CO ₂ (t)	0.923	$< 1 \times 10^{-124}$	0.965	$< 1 \times 10^{-174}$
Peso total – CO ₂ (t)	0.960	$< 1 \times 10^{-166}$	0.990	$< 1 \times 10^{-256}$

Se observó una correlación positiva muy fuerte y altamente significativa entre el peso total de la valva y la cantidad de CO₂ liberado, así como entre el índice morfométrico de talla y el CO₂. Esto indica que el aumento del tamaño y la masa calcárea de la valva se traduce directamente en una mayor liberación de CO₂ durante la reacción de descomposición del carbonato de calcio. Aunque los valores individuales de CO₂ se sitúan en el orden de 10^{-6} t, su agregación poblacional alcanza el orden de 10^{-4} t, evidenciando relevancia ambiental.

Análisis de varianza y pruebas no paramétricas equivalentes

Para evaluar diferencias significativas en la liberación de CO₂ según el tamaño y peso de la valva, los individuos fueron clasificados en cuartiles (Q1–Q4) de acuerdo con el peso total de la valva, siguiendo el esquema de análisis comparativo utilizado en el documento modelo.

Previamente, se evaluó la homogeneidad de varianzas mediante la prueba de Levene, y posteriormente se aplicaron ANOVA robusto de Welch y la prueba Kruskal–Wallis como alternativa no paramétrica.

Tabla 3

Estadísticos descriptivos del CO₂ liberado (t) por cuartiles de peso total

Cuartil	n	Media (t)	DE	Mín (t)	Máx (t)
Q1 (menor peso)	75	8.06×10^{-7}	1.77×10^{-7}	4.16×10^{-7}	1.14×10^{-6}
Q2	75	1.61×10^{-6}	5.77×10^{-7}	9.03×10^{-7}	2.95×10^{-6}
Q3	75	3.03×10^{-6}	2.43×10^{-7}	2.18×10^{-6}	3.51×10^{-6}
Q4 (mayor peso)	75	4.79×10^{-6}	1.42×10^{-6}	3.22×10^{-6}	6.87×10^{-6}

Tabla 4

Resultados de ANOVA robusto y prueba no paramétrica para CO₂ liberado (t)

Prueba	Estadístico	gl	p-valor
Levene	1.03×10^2	3, 296	$< 1 \times 10^{-44}$
Welch ANOVA	1.49×10^3	3, 149	$< 1 \times 10^{-110}$
Kruskal–Wallis	2.76×10^2	3	$< 1 \times 10^{-58}$

La prueba de Levene indicó heterogeneidad significativa de varianzas, lo que invalida el ANOVA clásico. Sin embargo, tanto el ANOVA robusto de Welch como la prueba de Kruskal–Wallis confirmaron diferencias altamente significativas entre los cuartiles de peso total. Estos resultados demuestran que las valvas de mayor masa contribuyen de manera desproporcionada a la liberación total de CO₂, alcanzando valores poblacionales del orden de 10⁻⁴ toneladas.

3 RESULTADOS

El análisis de la biomasa calcárea de *Anadara tuberculosa* permitió evidenciar, desde una perspectiva ambiental, el papel que las conchas desempeñan como reservorios de carbono inorgánico dentro de los ecosistemas de manglares Esmeraldas. A partir del procesamiento de 300 individuos (600 valvas) se constató que la estructura calcárea de la especie concentra una fracción sustancial de carbono fijado en forma de carbonato de calcio (CaCO_3), lo que la vincula directamente con la dinámica del dióxido de carbono (CO_2) a escala local.

3.1 Biomasa calcárea y almacenamiento de carbono inorgánico

Las mediciones morfológicas y gravimétricas mostraron que las valvas poseen una masa calcárea predominante respecto a la fracción orgánica residual, confirmando que la mayor parte de su estructura corresponde a material mineralizado. Desde el punto de vista ambiental, esta característica implica que el carbono atmosférico incorporado durante la calcificación queda inmovilizado temporalmente en la concha, actuando como un sumidero físico de carbono mientras la estructura se mantiene íntegra en el ecosistema. En manglares, donde los aportes de carbono orgánico son elevados, la presencia de bivalvos calcificadores añade una vía adicional de almacenamiento de carbono inorgánico que suele ser subestimada en evaluaciones ambientales.

3.2 Relación entre tamaño de la concha y potencial de retención de CO_2

Al integrar las dimensiones de largo, ancho y espesor como una medida global de talla, se observó que las conchas de mayor tamaño concentran una mayor cantidad de biomasa calcárea y, por tanto, un mayor contenido potencial de carbono. Desde una lectura ambiental, esto sugiere que los individuos de mayor talla aportan de manera desproporcionada al almacenamiento de carbono, no solo por su volumen, sino por la estabilidad estructural de sus conchas, que pueden persistir en el ambiente incluso después de la muerte del organismo.

3.3 Cuantificación del CO_2 asociado a la biomasa calcárea

La descomposición química controlada de las valvas permitió estimar la cantidad de CO_2 asociada a la biomasa calcárea procesada. A escala individual, los valores se situaron en el orden de 10^{-6} toneladas de CO_2 , mientras que la agregación de la muestra completa alcanzó el orden de 10^{-4} toneladas de CO_2 . Aunque estas magnitudes pueden parecer reducidas de manera aislada, su importancia ambiental emerge al considerar

poblaciones naturales densas y distribuidas ampliamente en los manglares, donde la acumulación de biomasa calcárea puede representar un volumen significativo de carbono fijado a lo largo del tiempo.

3.3 Implicaciones ambientales en ecosistemas de manglar

Desde un enfoque ecosistémico, los resultados indican que *Anadara tuberculosa* contribuye al balance local del carbono al integrar carbono atmosférico en estructuras minerales relativamente estables. En manglares como los de Esmeraldas, donde convergen procesos de alta productividad biológica y captura de carbono, la presencia de bivalvos calcificadores refuerza la capacidad del sistema para amortiguar concentraciones de CO₂ ambiental, al menos de forma indirecta y a escalas temporales intermedias.

Asimismo, la extracción intensiva de conchas prietas no solo tiene implicaciones poblacionales y socioeconómicas, sino que también podría reducir la capacidad del ecosistema para retener carbono inorgánico, al remover biomasa calcárea que actúa como depósito. En este sentido, los resultados obtenidos subrayan la necesidad de considerar a las conchas no únicamente como un recurso comercial, sino como un componente funcional del ciclo del carbono costero.

4 DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en esta investigación confirman que la biomasa calcárea de *Anadara tuberculosa* constituye un reservorio relevante de carbono inorgánico en forma de CaCO₃, cuya fracción carbonatada puede liberar CO₂ cuando ocurre disolución química, en este caso, bajo un escenario experimental controlado, esta evidencia es consistente con la idea de que los bivalvos calcificadores participan en la dinámica del carbono costero a través de dos rutas simultáneas, la retención temporal de carbono en la concha y la potencial liberación de CO₂ cuando ese carbonato se disuelve o se reequilibra el sistema carbonato, tal dualidad es central para interpretar el papel ambiental de las conchas sin sobredimensionar su contribución como “sumideros” netos.

En concordancia con este planteamiento, Pernet et al. discuten que la narrativa de “bivalvos como sumidero de CO₂” requiere cautela, porque la calcificación y la respiración pueden comportarse como fuentes, y el balance neto depende del sistema completo (carbono orgánico producido, biocalcificación, reequilibrio del carbonato y exportes), en ese marco, los resultados del presente estudio concuerdan en el punto clave de que el carbonato asociado a conchas representa carbono “contenible” pero no necesariamente “secuestrado” de manera neta y permanente, y difiere en el alcance,

porque aquí se cuantifica el CO_2 liberable por disolución completa del CaCO_3 en laboratorio, mientras que Pernet et al. evalúan el debate a escala de sistemas de cultivo y balances integrados, incluyendo procesos biológicos concomitantes que este diseño experimental no incorpora.

Desde una perspectiva complementaria, los estudios sobre acuicultura de bivalvos y dinámica del carbono han mostrado que el efecto climático no se reduce a la concha, por ejemplo, Nakayama et al. (2022) destacan que la formación de CaCO_3 tiende a actuar como una fuente neta de CO_2 hacia la atmósfera por el reacomodo del sistema carbonato, aunque el efecto real depende de la química del agua y de los flujos ecosistémicos asociados, esta idea converge con el hallazgo estadístico del presente trabajo, donde la liberación de CO_2 se incrementa sistemáticamente con el tamaño integrado (talla) y, de forma más marcada, con el peso total de la valva, es decir, existe una relación fuerte entre biomasa calcárea y CO_2 liberable, pero se diferencia en el enfoque, porque Nakayama et al. discuten el efecto del cultivo sobre captura y emisión en el ecosistema, mientras que este estudio cuantifica la fracción liberable bajo descomposición química, una medida útil para entender el “potencial de liberación” del CaCO_3 , no el flujo neto in situ.

En el mismo eje de comparación, Martini et al. (2022) integran la evaluación ambiental mediante análisis de ciclo de vida (LCA) y discuten el papel de la biocalcificación dentro del desempeño climático de la mitilicultura, enfatizando que cualquier conclusión sobre mitigación debe considerar el sistema completo, incluidos insumos, cosecha y destino del producto, este enfoque coincide con la necesidad, derivada de nuestros resultados, de contextualizar que el CO_2 cuantificado corresponde a la fracción asociada a la concha y a su descomposición, y no representa por sí misma una captura neta del aire, la diferencia sustantiva radica en que Martini et al. integran emisiones y capturas a lo largo de la cadena productiva, mientras que aquí se aporta una cuantificación experimental directa del CO_2 equivalente del CaCO_3 de *A. tuberculosa* en un contexto silvestre-comercial de manglar.

A escala de “remoción de CO_2 ” más explícita, investigaciones recientes como Chen et al. (2025) proponen que la actividad ostrícola puede operar como un hotspot de remoción neta cuando la producción y destino del carbono orgánico supera el CO_2 asociado a la formación de concha, este planteamiento es compatible con la lectura ambiental de que los bivalvos pueden contribuir a reducir CO_2 en ciertos contextos, pero también delimita claramente la diferencia con el presente estudio, aquí se cuantifica la magnitud del CO_2 asociada a la biomasa calcárea (y por tanto su potencial de liberación), sin medir directamente la fracción de carbono orgánico producida, exportada o enterrada, por ello, la concordancia se establece en el carácter “biogeoquímico” del rol de los bivalvos, y la discrepancia se ubica en el tipo de balance, neto-integrado en Chen et al., versus liberable-estequiométrico en este trabajo.

En ecosistemas de manglar, la dimensión ambiental se vuelve más compleja porque el ciclo del carbono incluye rutas de alcalinidad e intercambio aire–agua, Saderne et al. (2021) muestran que los manglares pueden generar alcalinidad y afectar el sistema carbonato, lo que influye en el destino del CO_2 y en su permanencia en el océano como bicarbonato, esta evidencia se relaciona con el presente estudio en el sentido de que las conchas calcáreas de *A. tuberculosa* deben interpretarse dentro de un marco donde la química local (alcalinidad, pH, intercambio) puede modular si el carbonato permanece estable o tiende a disolverse, por ende, el “impacto climático” de la concha no depende solo de su masa, sino también de las condiciones biogeoquímicas del manglar, a diferencia del laboratorio, donde la disolución fue forzada y completa para cuantificar el CO_2 liberable.

Finalmente, la permanencia del carbono en forma de conchas depende del destino físico del carbonato, Handley et al. (2025) discuten que la exposición de conchas a disolución superficial y procesos tafonómicos puede limitar su capacidad para compensar emisiones asociadas a su formación, esta perspectiva converge con el resultado de que las conchas almacenan carbono inorgánico “mientras existen como carbonato”, pero si son removidas, fragmentadas o disueltas, el sistema puede revertir parte de ese almacenamiento, la diferencia con el presente trabajo es que Handley et al. evalúan estabilidad y pérdida en sedimentos reales, mientras que aquí se aporta un valor experimental que delimita el máximo CO_2 liberable de la fracción calcárea, útil como parámetro de referencia para discutir escenarios de permanencia o pérdida en el ambiente.

Al contrastar con estos autores se refuerzan tres conclusiones interpretativas coherentes con la evidencia estadística y ambiental del estudio, primero, existe una relación robusta entre talla/peso y CO_2 liberable, lo cual es esperable y está en línea con la literatura que vincula masa calcárea y dinámica del CO_2 en el sistema carbonato, segundo, el potencial “beneficio climático” de las conchas no puede afirmarse únicamente desde la masa de CaCO_3 , porque el balance neto depende de procesos ecosistémicos (alcalinidad, productividad, intercambio aire–agua, destino sedimentario), tercero, el aporte principal de esta investigación es ofrecer una cuantificación experimental trazable del CO_2 asociado a la biomasa calcárea de *A. tuberculosa* en Manta, que puede integrarse como insumo en evaluaciones ambientales más amplias (balances netos, escenarios de permanencia, manejo extractivo) sin confundir “carbono contenido” con “carbono secuestrado” de forma neta y permanente.

5 CONCLUSIONES

La presente investigación permitió analizar de manera integral la biomasa calcárea de *Anadara tuberculosa* y su relación con la dinámica del dióxido de carbono en ecosistemas de manglar de Esmeraldas, comercializadas en la provincia de Manabí. A partir de un enfoque experimental con énfasis ambiental, se evidenció que las conchas de esta especie constituyen estructuras mineralizadas capaces de almacenar carbono inorgánico en forma de carbonato de calcio, el cual permanece inmovilizado mientras la concha se mantiene estable en el ambiente, pero puede ser liberado como CO₂ bajo procesos de disolución, naturales o inducidos.

Los resultados obtenidos demuestran que la estructura morfométrica de las valvas, considerada de manera integrada a través de sus dimensiones y su peso total, se encuentra estrechamente relacionada con la cantidad de carbono inorgánico almacenado. Las conchas de mayor tamaño y masa calcárea concentran una fracción superior de carbono, lo que sugiere que los individuos de mayor talla desempeñan un papel más relevante en la retención temporal de CO₂ dentro del ecosistema. Esta relación estructural refuerza la importancia de considerar la biomasa calcárea como un componente funcional del ciclo del carbono costero.

La cuantificación experimental del dióxido de carbono asociado a la biomasa calcárea evidenció que, aunque los valores individuales se sitúan en el orden de 10⁻⁶ toneladas de CO₂, la agregación de individuos permite alcanzar magnitudes del orden de 10⁻⁴ toneladas a escala poblacional. Desde una perspectiva ambiental, este resultado pone de manifiesto que poblaciones naturales densas de *A. tuberculosa* pueden representar reservorios relevantes de carbono inorgánico, cuya contribución no debe ser ignorada en evaluaciones locales del balance de carbono.

Asimismo, los hallazgos resaltan que la función ambiental de las conchas no puede interpretarse únicamente como un proceso de captura permanente de CO₂ atmosférico. El almacenamiento de carbono en forma de CaCO₃ está condicionado por factores fisicoquímicos del entorno, como la alcalinidad, el pH y la dinámica sedimentaria del manglar, los cuales determinan la estabilidad o disolución del carbonato. En este sentido, las conchas actúan como un componente dinámico del sistema carbonato, capaz de amortiguar o liberar CO₂ dependiendo del contexto ambiental.

Se concluye que *Anadara tuberculosa* desempeña un rol ambiental significativo dentro de los manglares de Esmeraldas, no solo por su valor ecológico y socioeconómico, sino también por su participación en los procesos biogeoquímicos del carbono. La información generada en este estudio aporta evidencia científica para integrar la biomasa calcárea de bivalvos en análisis ambientales más amplios y para

considerar su manejo sostenible como parte de estrategias de conservación y mitigación frente al cambio climático en ecosistemas costeros tropicales.

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alin, S. R., Feely, R. A., Dickson, A. G., Hernández-Ayón, J. M., Juranek, L. W., Ohman, M. D., & Peterson, W. T. (2017). Robust empirical relationships for estimating the carbonate system in the California Current System and application to ocean acidification studies. *Global Biogeochemical Cycles*, 31(2), 1–18. <https://doi.org/10.1002/2016GB005626>
- Chen, X., Li, L., Duarte, C. M., & Hu, Z. (2025). Oyster aquaculture as a hotspot for net atmospheric CO₂ removal. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 122(15), e2504004122. <https://doi.org/10.1073/pnas.2504004122>
- Cyronak, T., Santos, I. R., McMahon, A., & Eyre, B. D. (2018). Carbon cycling hysteresis in permeable carbonate sands over a diurnal cycle. *Limnology and Oceanography*, 63(2), 1–15. <https://doi.org/10.1002/lno.10636>
- Giraldo, A., Montes, R., & Rodil, R. (2017). Ecotoxicological evaluation of the UV filters ethylhexyl dimethyl p-aminobenzoic acid and octocrylene using marine organisms *Isochrysis galbana*, *Mytilus galloprovincialis* and *Paracentrotus lividus*. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 73(4), 606–611. <https://doi.org/10.1007/s00244-017-0399-4>
- Handley, L., Walling, K., Burdett, H. L., & Donnarumma, L. (2025). Fate of shellfish carbonate in coastal sediments and implications for carbon budgets. *Marine Geology*. Advance online publication. https://research-repository.st-andrews.ac.uk/bitstream/10023/32701/1/Handley_et_al._Shellfish_carbonate_in_sediments-accepted.pdf
- Islam, M. A., Blasco, J., & Araújo, C. V. M. (2019). Spatial avoidance, inhibition of recolonization and population isolation in zebrafish (*Danio rerio*) caused by copper exposure under a non-forced approach. *Science of the Total Environment*, 667, 504–511. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.384>
- Macreadie, P. I., Costa, M. D., Atwood, T. B., Friess, D. A., Kelleway, J. J., Kennedy, H., Lovelock, C. E., Serrano, O., & Duarte, C. M. (2017). Blue carbon as a natural

- p>climate solution. Nature Climate Change, 7(9), 1–7.
-
- <https://doi.org/10.1038/nclimate3320>
- Martini, S., Vázquez-Rowe, I., & Moreira, M. T. (2022). Environmental performance of mussel aquaculture: A life cycle assessment perspective. *Science of the Total Environment*, 806, 150469.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150469>
- Meysman, F. J. R., & Montserrat, F. (2017). Negative CO₂ emissions via enhanced silicate weathering in coastal environments. *Biogeosciences*, 14(3), 1–20.
<https://doi.org/10.5194/bg-14-1-2017>
- Moreira-Santos, M., Donato, C., Lopes, I., & Ribeiro, R. (2008). Avoidance tests with small fish: Determination of the median avoidance concentration and of the lowest-observed-effect gradient. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 27(7), 1576–1582.
<https://doi.org/10.1897/07-094.1>
- Moreira-Santos, M., Ribeiro, R., & Araújo, C. V. M. (2019). What if aquatic animals move away from pesticide-contaminated habitats before suffering adverse physiological effects? *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 49(7), 1–31.
<https://doi.org/10.1080/10643389.2018.1564507>
- Morris, J. P., & Humphreys, M. P. (2019). Calcification, dissolution and the marine carbonate system. *Oceanography*, 32(3), 1–12.
<https://doi.org/10.5670/oceanog.2019.321>
- Nakayama, T., Kudo, I., & Matsumoto, K. (2022). Carbon dioxide dynamics associated with shell formation in coastal bivalve aquaculture systems. *Science of the Total Environment*, 838, 155744.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155744>
- Park, C. B., Jang, J., & Kim, S. (2017). Toxicity of individual and mixed organic UV filters, ethylhexyl methoxycinnamate, octocrylene and avobenzone, in *Daphnia magna*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 137, 57–63.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.11.017>
- Pernet, F., Tremblay, R., Comeau, L. A., & Guderley, H. (2023). Are bivalves a climate solution? Revisiting shell formation and carbon budgets. *Reviews in Aquaculture*, 15(1), 1–17.
<https://doi.org/10.1111/raq.12954>
- Pérez, L. F., Torres, A., & Rodríguez, J. P. (2021). Sustainability of benthic resource exploitation in tropical coastal ecosystems. *Ocean & Coastal Management*, 210, 105706.
<https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.105706>

Saderne, V., Fusi, M., Thomson, T., Dunne, A., Maher, D., Carvalho, S., & Duarte, C. M. (2021). Mangrove alkalinity production drives carbon sequestration in coastal waters. *Limnology and Oceanography Letters*, 6(2), 61–70. <https://doi.org/10.1002/lol2.10170>