

ARTICULO ORIGINAL

Tasas netas de acreción de carbonato de calcio en el complejo de ecosistemas marinos-costeros de la Ensenada Rancho Luna, Cienfuegos, Cuba

Net rates of calcium carbonate accretion in the marine-coastal ecosystem complex of Ensenada Rancho Luna, Cienfuegos, Cuba

Luis Angel Aragón-López¹
Miguel Gómez-Batista^{1*}
Gabriel Rojas Abrahantes¹
Yusmila Helguera Pedraza¹

¹ Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos AP 5, Ciudad Nuclear, 59350, Cienfuegos, Cuba

Autor para correspondencia:
miguel@ccac.cu

OPEN ACCESS

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

Editor:
Susana Perera Valderrama
CONABIO, México, DF

Recibido: 23.09.2022
Aceptado: 06.09.2023

<https://revistas.uh.cu/rim/>
<https://doi.org/10.5281/zenodo.10576631>

REVISTA INVESTIGACIONES MARINAS
RNPS: 2096 • ISSN: 1991-6086 • VOL. 43 • No. 2 • JULIO-DICIEMBRE • 2023 • pp. 68-79

Resumen

Debido a las emisiones cada vez mayores de dióxido de carbono a la atmósfera, la absorción de este gas por el océano se realiza a gran velocidad, provocando un aumento en la acidez del agua de mar. Este proceso, conocido como acidificación oceánica, conlleva a que en muchos organismos calcificadores se reduzca la capacidad de formar sus estructuras de carbonato de calcio. El objetivo de esta investigación fue determinar las tasas netas de acreción de carbonato de calcio ($\text{g CaCO}_3 \text{ cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$) de taxones de sucesión temprana, en el complejo de ecosistemas marinos-costeros de la Ensenada Rancho Luna, Cienfuegos. Para la cuantificación de la tasas netas de acreción de carbonato de calcio se construyeron 12 dispositivos de muestreo basados en la metodología Vargas-Ángel *et al.* en el 2015, posicionándose seis de ellos en cada ecosistema estudiado (manglar y arrecife). Los valores medios de netas de acreción de carbonato de calcio fueron de $0.87 \pm 0.19 \text{ g CaCO}_3 \text{ cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$ en el arrecife y $0.59 \pm 0.05 \text{ g CaCO}_3 \text{ cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$ en el manglar. Se identificaron siete taxones, correspondientes a cuatro grupos funcionales de sucesión temprana, el césped (turf), el CaCO_3 /sedimento, el grupo funcional Sin Calcio y las algas coralinas costrosas. Estas últimas fueron las principales aportadoras de CaCO_3 , encontrándose principalmente en el arrecife. Se determinó a la magnesita como forma cristalina de CaCO_3 dominante, y las algas coralinas costrosas, el grupo de mayor vulnerabilidad ante el efecto de la acidificación oceánica.

PALABRAS CLAVE: calcificación, alga coralina costrosa, acidificación, unidad de acreción, arrecife, Cuba.

Abstract

Due to the increasing emissions of carbon dioxide into the atmosphere, the absorption of this gas by the ocean is carried out at great speed, causing an increase in the acidity of seawater. This process, known as ocean acidification, leads to a reduction in the ability of

many calcifying organisms to form their calcium carbonate structures. The objective of this research was to determine the net rates of calcium carbonate accretion ($\text{g CaCO}_3 \text{ cm}^{-2} \text{ yr}^{-1}$) of early successional taxa, in the marine-coastal ecosystem complex of Ensenada Rancho Luna, Cienfuegos. To quantify the net calcium carbonate accretion rates, 12 sampling devices were built based on the Vargas-Ángel *et al.* in 2015, positioning six of them in each ecosystem studied (mangrove and reef). The mean values of net calcium carbonate accretion rates were $0.87 \pm 0.19 \text{ g CaCO}_3 \text{ cm}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ in the reef and $0.59 \pm 0.05 \text{ g CaCO}_3 \text{ cm}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ in the mangrove swamp. Seven taxa were identified, corresponding to four early successional functional groups, grass (turf), CaCO_3 /sediment, Calcium-free functional group, and crusted coralline algae. The latter were the main contributors of CaCO_3 , being found mainly in the reef. Magnesite was determined as the dominant crystalline form of CaCO_3 , and crusty coralline algae, the group with the greatest vulnerability to the effect of ocean acidification.

KEYWORDS: Calcification, coarse crust algae, acidification, accretion unit, reef, Cuba.

Introducción

El océano absorbe alrededor del 25 % del dióxido de carbono (CO_2) atmosférico derivado de la quema de combustibles fósiles, la deforestación y los cambios de uso del suelo (IPCC, 2014). Debido a las emisiones cada vez mayores de CO_2 a la atmósfera, la absorción de este gas por el océano se realiza a gran velocidad, provocando cambios perceptibles en la química de los mares, reflejado en su progresiva acidificación (Sabine *et al.*, 2004).

Se plantea que el proceso de la acidificación ha aumentado en un 30 % desde los principios de la revolución industrial. Según el criterio de expertos, la tasa actual de cambio del pH es mucho más rápida que cualquiera de las experimentadas previamente en los últimos 55 millones de años (Gattuso *et al.*, 2009, Jokiel, 2011). De acuerdo a las proyecciones del futuro para

2060 la acidez del agua de mar podría aumentar en un 120 % (Doney *et al.*, 2009; Gattuso *et al.*, 2015).

Muchos organismos del océano forman esqueletos o conchas de carbonato de calcio (CaCO_3), como el plancton microscópico que forma la base de la cadena alimentaria (Melendez & Salisbury, 2017; Morse. J *et al.*, 2007; Reis *et al.*, 2016), los crustáceos y moluscos utilizados cotidianamente en la dieta del hombre, los corales e incluso las algas coralinas costrosas (CCA, siglas en inglés), que cubren gran parte de la superficie de los arrecifes de coral, secretando una forma de CaCO_3 (aragonito) que se podría disolver fácilmente si los mares continúan volviéndose más ácidos (Lee. D & Carpenter. S.J, 2001).

La acidificación oceánica no está sólo disminuyendo progresivamente la capacidad de muchos organismos de construir sus conchas. Existe cada vez mayor evidencia de que un escenario de altas emisiones de CO_2 también afectará progresivamente a la estructura y funcionamiento de los ecosistemas, con un riesgo alto o muy alto para las pesquerías y acuicultura de moluscos en regiones vulnerables (IPCC, 2014). La mayoría de las regiones del océano se volverán inhabitables para los arrecifes de coral, afectando además al turismo, la protección de la línea de costa y la biodiversidad (Obst *et al.*, 2020).

La región de América Latina y el Caribe abarca muestras de todos los ecosistemas y recursos marinos particularmente vulnerables a los efectos de la acidificación de los océanos. En estos ecosistemas, factores locales como la polución producto de la actividad humana, podrían exacerbar los impactos de la acidificación de los océanos, como es el caso de las islas del Caribe, donde el estado de saturación del carbonato en aguas marinas ha disminuido en alrededor de un 3% por década en los últimos 17 años (McCauley *et al.*, 2015).

En este contexto, conocer las tasas de acumulación de CaCO_3 , así como identificar las especies de mayor y menor grado de vulnerabilidad es hoy una necesidad de investigación a nivel global, regional y local. Basado en

esta necesidad, el objetivo de esta investigación fue determinar las tasas de acumulación de CaCO_3 y taxones sucesionales primarios en el complejo de ecosistemas marinos-costeros (arrecife y manglar) de la Ensenada Rancho Luna, en Cienfuegos, para prever los efectos de la acidificación oceánica en la zona de estudio.

Materiales y metodos

Área de estudio

La investigación se llevó a cabo en el complejo de ecosistemas marinos-costeros de la Ensenada Rancho Luna, en la provincia Cienfuegos, localizada en la región centro sur de Cuba. Esta ensenada, con una extensión aproximada de 3.7 km, se ubica entre Punta Colorados (22.03242, -80.44159) y Punta Gavilán (22.01620, -80.41086). Por el sur toda la zona de estudio recibe la influencia del Mar Caribe. La temperatura del agua en esta área varía de 24 °C a 29 °C, entre los meses de

invierno y verano. La salinidad en toda el área somera de plataforma abierta al Mar Caribe es de 37‰ como promedio.

En el área de estudio se establecieron dos estaciones de muestreo. La primera estación se ubicó en la entrada de un estero semicerrado de manglar, a una profundidad entre 1 y 2 m. La segunda, en el arrecife coralino el Laberinto, localizado a 300 m del margen costero, a una profundidad de 8 m aproximadamente. Esta última constituye uno de los sitios de buceo contemplativo más visitado por los clientes del Centro Internacional de Buceo “Faro Luna” de la Marina Marlin, enclavado en esta ensenada (Fig. 1).

La selección del sitio de investigación se basó en varios criterios fundamentales. La accesibilidad al lugar fue un factor primordial, facilitando la logística y el acceso a campo de manera efectiva. Además, la colaboración establecida con el Centro Internacional de Buceo



Fig. 1. Localización del área de estudio y estaciones de muestreo: manglar (punto 1 en rojo) y arrecife (punto 2 en azul).

de Faro Luna en Cienfuegos resultó de gran importancia, ya que este centro mantiene un interés significativo en la zona, utilizando la misma para la práctica de buceo recreativo. La existencia de estudios previos en la zona proporcionó un valioso contexto, permitiéndonos comprender de manera más profunda la dinámica del entorno investigado. Por otro lado, tras un exhaustivo análisis de la literatura científica relacionada con el tema, se identificaron ambientes homólogos a los propuestos en la literatura, validando así la idoneidad del lugar seleccionado para la realización de una investigación de esta naturaleza. Estos criterios en conjunto respaldan la elección de nuestro sitio de estudio como una ubicación óptima para llevar a cabo esta investigación científica.

Dispositivo de muestreo

Basado en el modelo de las unidades de acreción de la calcificación (CAU; Calcification Accretion Units) (Price *et al.*, 2012; Vargas-Ángel *et al.*, 2015), se construyó un dispositivo de muestreo con las características similares. Este dispositivo se dividió en dos secciones, la base, conformada por un soporte metálico de aproximadamente 50 cm de longitud y un tubo plástico adherido éste, que sirvió de soporte a la segunda sección, la de colecta o placa de exposición (Fig. 2). La placa de exposición se construyó con material acrílico, con dimensiones de 20 x 15 cm y un grosor de 1 cm aproximadamente. Cada placa se lijó para proporcionar una superficie no brillante adecuada para la fijación permanente de los organismos.

Muestreo

Mediante buceo autónomo se posicionaron seis dispositivos codificados en cada estación. Siguiendo la metodología utilizada por Vargas-Ángel *et al.*, 2015, los dispositivos se colocaron aproximadamente a 30 cm por encima del sustrato y separados por 1 m entre ellos. Estos permanecieron expuestos por un período de 69 días, entre el 25 de enero y el 4 de abril de 2018. Al culminar el período de exposición, se realizó la extracción

de los dispositivos recuperándose el 100 % de los mismos. Las placas de colecta fueron desmontadas y colocadas cuidadosamente en bolsas de polietileno para minimizar la pérdida de organismos adheridos o material calcificado durante el traslado al laboratorio.

Procesamiento de las placas

En el laboratorio las placas se enjuagaron con agua de mar para eliminar los depósitos móviles (p. ej. fauna, sedimento y arena) y fueron fotografiadas por cada una de sus superficies para determinar la cobertura de los grupos funcionales adheridos. Posteriormente se secaron a 60 °C en una estufa durante 2-5 días. Las placas se consideraron secas cuando la diferencia de peso entre pesadas secuenciales de una misma placa fue menor a 0.1 g (balanza semianalítica con un margen de error de 0.01 g). Después del secado, cada placa se sumergió individualmente en HCl al 5 % durante 24 h o hasta que



Fig. 2. Dispositivo de muestreo para estimación de la tasa de calcificación. Adaptado de Price *et al.*, (2012).

todo el carbonato de calcio se disolvió. Durante el proceso de disolución las placas se agitaron periódicamente cada 1-4 h para favorecer la disolución del carbonato de calcio. Finalmente, las placas fueron nuevamente secadas y pesadas (Vargas-Ángel *et al.*, 2015).

Cálculo de la tasa de acreción de calcificación

Para determinar la tasa neta de acreción de calcificación ($T_{\text{calcificación}}$), se estableció el tiempo de exposición de los dispositivos ($t = 69$ días), se calculó el área total de cada placa (A) y se determinaron los pesos siguientes: i) peso de la placa seca con material orgánico y calcáreo antes de ser sumergida en HCl al 5 % ($P_{\text{orgánico+calcáreo}}$) y ii) peso de la placa seca después de ser expuesta al HCl al 5 % ($P_{\text{orgánico}}$). La $T_{\text{calcificación}}$ ($\text{g CaCO}_3 \text{ cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$) se calculó mediante la siguiente ecuación (Price *et al.*, 2012, Vargas-Ángel *et al.*, 2015):

$$T_{\text{calcificación}} = \frac{(P_{\text{orgánico+calcáreo}} - P_{\text{orgánico}})}{A * t}$$

El valor de la incertidumbre (u) de la **tasa de acreción de calcificación** se calculó mediante la formulación

$$u = \frac{DE}{\sqrt{n}}$$

Donde DE representa la desviación estándar de **tasa de acreción de calcificación** calculadas para cada biotopo y n representa el número de CAU (6) en cada biotopo estudiado (Ellison *et al.*, 2012)

Determinación del porcentaje de cobertura

Para calcular el porcentaje de superficie cubierta por organismos adheridos a las placas de colecta (porcentaje de cobertura), ambas superficies fueron fotografiadas y analizadas a través del programa ImageJ (versión 1.40). El porcentaje de cobertura de cada sitio y grupos funcionales se determinó calculando la relación entre el área cubierta por organismos y el área total de la superficie analizada. Los taxa se clasificaron en grupos

funcionales y según la mineralogía del esqueleto de CaCO_3 , teniendo en cuenta los criterios de Tucker y Wright (1990), Smith *et al.* (2012) y Goldberg (2013) citado en Vargas-Ángel *et al.* (2015).

Análisis de datos

Los valores de las tasas de acreción de calcificación fueron sometidos a pruebas de normalidad (test de Shapiro Wilk) y de homogeneidad de varianzas (Levene de igualdad de varianzas) como premisas de las pruebas paramétricas. Confirmada la normalidad de los datos, se aplicó la prueba t-Student a las variables tasas de acreción de calcificación y porcentaje de cobertura de los grupos funcionales, para evaluar diferencias entre biotopos. Todo el procesamiento estadístico de los datos se realizó utilizando el paquete estadístico Statsoft Statistica 7.0.61.0.

Resultados

Estimación de la tasa de acreción de calcificación

Las tasas de acreción de calcificación determinada en el biotopo arrecife osciló entre 0.43 y 1.69 $\text{g CaCO}_3 \text{ cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$, con una media ($\pm u$) de $0.87 \pm 0.19 \text{ g CaCO}_3 \text{ cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$, siendo éste el sitio de muestreo en el que se observaron los mayores valores. En el manglar la media ($\pm u$) de la tasas de acreción de calcificación fue de $0.59 \pm 0.07 \text{ g CaCO}_3 \text{ cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$ y sus valores oscilaron entre 0.26 y 0.78 $\text{g CaCO}_3 \text{ cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$. Al aplicar la prueba t-Student ($t = 1.33$; $p > 0.05$, gl 10) se comprobó que no existieron diferencias significativas entre la tasa de calcificación de ambos biotopos (Fig. 3).

Identificación de los grupos funcionales y clasificación según la mineralogía de CaCO_3

Como resultado del análisis fotográfico y siguiendo el criterio de identificación de Vargas-Ángel *et al.* (2015) se encontraron siete taxa, correspondientes a cuatro grupos funcionales: el césped (turf), el CaCO_3 /sedimento, el grupo funcional Sin Calcio y el grupo de las algas costosas coralinas (CCA, siglas en inglés)

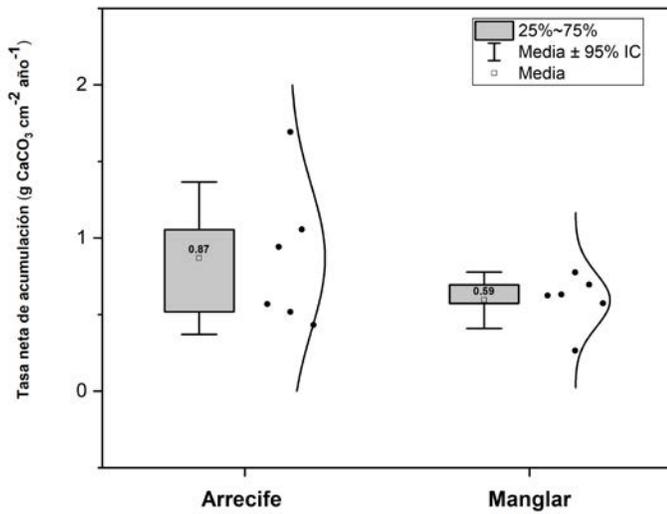


Fig. 3. Tasas de neta de acumulación de carbonato de calcio ($\text{g CaCO}_3 \text{cm}^{-2} \text{año}^{-1}$) en biotopos de la Ensenada Rancho Luna, Cuba.

(Tabla 1). En el biotopo manglar fue donde se encontró el mayor número de grupos funcionales.

Del análisis del porcentaje de cubrimiento de los grupos funcionales, se observó en el arrecife el mayor valor de cubrimiento, aportado en un 49.87 % por las CCA. En el manglar se obtuvo el menor valor, correspondiente al grupo funcional de CaCO_3 /Sedimento, con un 3.47 % de cobertura. El grupo funcional

Tabla 1. Grupos funcionales identificados en las unidades de acreción y mineralogía de CaCO_3 . Adaptada de Vargas-Ángel *et al.* (2015)

| Grupos funcionales | Taxa | Mineralogía de CaCO_3 |
|---------------------------------|-------------------------|--------------------------------|
| Algas costrosas coralinas (CCA) | CCA blancas | Mg-Calcita |
| | CCA rosadas | Mg-Calcita |
| CaCO_3 /Sedimento | Ramificación de arena | Aragonita |
| | Sedimento | Aragonita |
| Césped (Turf) | Turf | NC |
| Sin Calcio (NC) | Incrustaciones naranjas | NC |
| | Huevos invertebrados | NC |

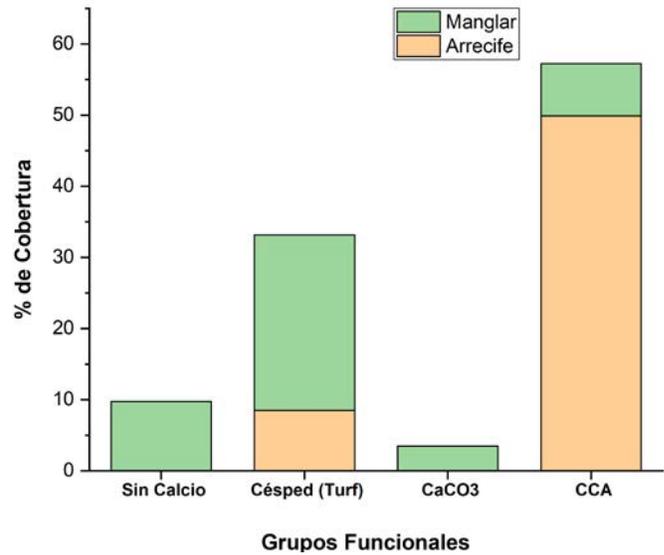


Fig. 4. Porcentaje de cubrimiento de grupos funcionales adheridos a las placas de exposición situadas en la Ensenada Rancho Luna, Cuba.

césped se observó en los dos biotopos, representando en el manglar un 24.68 %, mientras que en el arrecife solamente un 8.47 % de cubrimiento. Los valores de los grupos funcionales CCA y Sin Calcio en el manglar se encontraron por debajo del 10%, con valores de 7.37 % y 9.72%, respectivamente (Fig. 4; Material Complementario MCI).

La prueba de t-Student realizada para comprobar diferencias entre los biotopos estudiados, respecto al porcentaje de cobertura de los grupos funcionales comunes, indicó diferencias significativas solamente para el grupo de las CCA ($t = 8.13$; $p < 0.05$, gl 10) (Fig. 5).

De acuerdo a los criterios seguidos para la clasificación de la mineralogía del CaCO_3 de los grupos funcionales, los calcificadores identificados en este estudio precipitan dos formas de CaCO_3 : magnesita y aragonita (Tabla 1). El mayor porcentaje de incrustación de magnesita (49.84 %) fue encontrado en el arrecife, mientras que en el manglar se observó solo un 7.37 % de este polimorfo. La aragonita estuvo presente solamente en el manglar y en pequeña medida (3.47 %). En los dos biotopos se observaron estructuras sin carbonato de calcio,

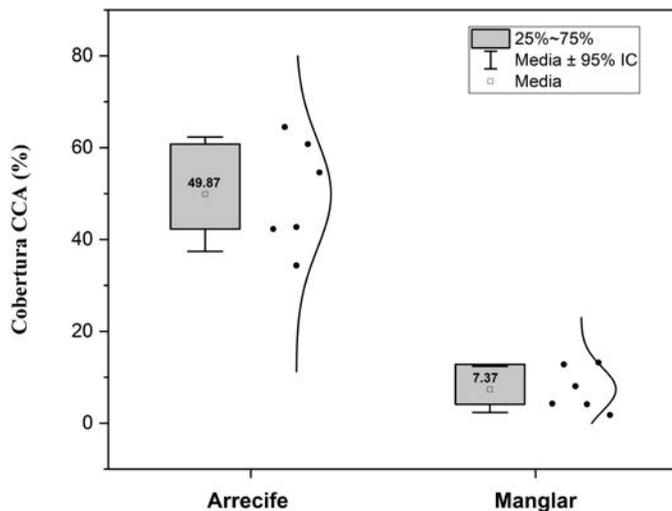


Fig. 5. Porcentaje de cubrimiento de algas coralinas costosas adheridas a las placas de exposición situadas en la Ensenada Rancho Luna, Cuba.

representadas en el manglar por huevos de invertebrados (34.40 %) y en el arrecife por césped (8.47 %) (Fig. 6).

Discusión

La cuantificación de la tasas de acreción de calcificación de las principales especies formadoras de arrecife permite evaluar el estado de salud en que se encuentran las especies y el arrecife en general (Kuffner *et al.*, 2013). En esta investigación los valores de tasas de acreción de calcificación variaron en dependencia al sitio en donde las placas de colecta fueron posicionadas (arrecife o manglar), resultado similar en la investigación realizada por Vargas-Ángel *et al.* (2015) donde comparan dos ecosistemas diferentes (arrecife y laguna). Al igual que Vargas-Ángel y colaboradores los mayores valores se registraron en el arrecife, y esto se atribuyó a las condiciones naturales existentes en este ecosistema con respecto al manglar (González *et al.*, 2015). En el arrecife de forma natural existe una mayor probabilidad de que larvas de organismos de estructuras calcáreas se fijen a las placas de acreción y de ahí se desarrollen y crezcan en dichas superficies, por otro lado en el ecosistema manglar

los niveles de sedimentos en suspensión son mayores y esto compite con la colonización de organismos sobre las placas de acreción. (Bernardo *et al.*, 2015; Medellín *et al.*, 2016).

Los valores de tasas de acreción de calcificación encontrados en los sitios estudiados exhiben notables diferencias en comparación con investigaciones análogas (ver Tabla 2). Las investigaciones previas a las que hacemos referencia generalmente emplearon un período de exposición que se extendió principalmente a lo largo de dos años. Nuestros resultados, sin embargo, se obtuvieron con un corto tiempo de exposición de tan solo 69 días, durante el cual las influencias de las presiones bióticas y abióticas que inducen la pérdida del carbonato de calcio incorporado en las estructuras de los organismos calcificadores adheridos a las placas fueron de menor magnitud. En consecuencia, proponemos que para futuras investigaciones se considere la adopción de un periodo de exposición más prolongado, similar al de las investigaciones análogas (es decir, dos años). Siguiendo la perspectiva de Johnson *et al.* (2022) y Doney *et al.* (2009), quienes argumentan que, dado que las unidades de acumulación de carbonato (CAU) no cuentan con protección contra factores como la herbivoría,

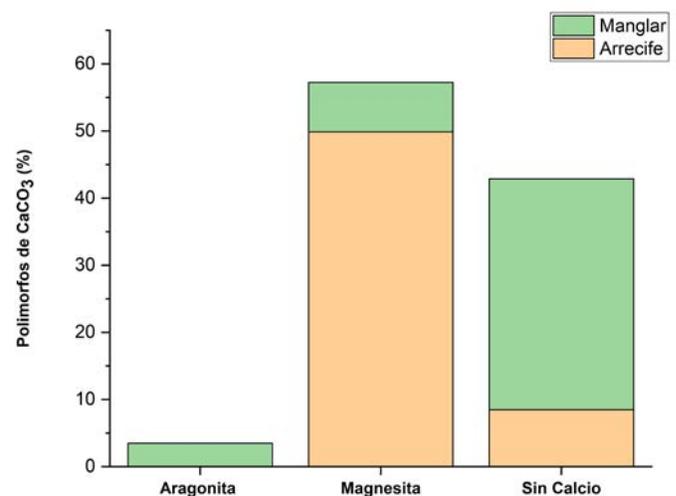


Fig. 6. Porcentaje de polimorfos de CaCO_3 precipitado en las placas de exposición.

Tabla 2. Comparación de Tasas de neta de acumulación de carbonato de calcio (biomasa calcificada, g CaCO₃ cm⁻² año⁻¹) determinadas en arrecifes de coral y senescentes. Adaptada de Johnson. *et al.*, (2022)

| Localización | Región Oceánica | Ecosistema | Biomasa calcificada | Referencia |
|----------------------|-------------------------|-----------------------------|---------------------|----------------------------|
| Pedre de Leste | Atlántico sudoccidental | Arrecife de plataforma | 0.044 | Reis <i>et al.</i> (2016) |
| Abrolhos Archipelago | | Otro Arrecife de plataforma | 0.075 | |
| Parcel de Abrolhos | | | 0.046 | |
| Queimada Grande Reef | Atlántico sudoccidental | Arrecife senescente | 0.013 | Randi <i>et al.</i> (2021) |
| Palmyra Atoll | Pacífico central | Arrecife de coral | 0.070 | Price <i>et al.</i> (2012) |
| Kingman Reef | | | 0.089 | |
| Jarvis Island | | | 0.194 | |
| Baker Island | | Arrecife de coral | 0.072 | |
| Howland Island | | | 0.082 | |
| Palmyra Atoll | | | 0.074 | |
| Hingman Reef | | | 0.085 | |
| Jarvis Island | | 0.104 | | |
| Rancho Luna Beach | Mar Caribe | Arrecife de coral | 0.867 | Este estudio |
| Rancho Luna Beach | | Manglar | 0.594 | |

la depredación y los eventos climatológicos, cualquier acumulación de carbonato representa una acreción neta, es esencial un estudio a largo plazo para captar adecuadamente las tasas de acreción neta de calcificación, donde las presiones bióticas y abióticas del entorno desempeñen un papel fundamental.

Las pruebas estadísticas aplicadas indicaron que no existieron diferencias entre las tasas de acreción de calcificación de los ecosistemas estudiados en la Ensenada Rancho Luna, lo que se supone principalmente, al limitado tiempo de exposición empleado en esta investigación y esto se demuestra al comparar nuestros resultados con investigaciones similares, como la de Johnson *et al.* (2022) y Vargas-Ángel *et al.* (2015) donde el tiempo de exposición es mayor, y se observan diferencias entre tasas de acreción de calcificación de los ecosistemas analizados (Tabla 2). Los corales se desarrollan a un ritmo lento, tanto que crecen entre 5 y 25 mm por año aproximadamente (Kuffner *et al.*, 2013), por lo que el tiempo es un factor fundamental en la cuantificación de la tasa de acreción de calcificación. No obstante, teniendo en cuenta las diferencias encontradas para el área en estudio respecto al porcentaje

de cobertura de las CCA (principales aportadoras de CaCO₃) pudiera esperarse que para mayores tiempos de exposición se observen diferencias entre las tasas de acreción de calcificación de los distintos ecosistemas estudiados (arrecife y manglar).

Los grupos funcionales encontrados en las superficies de las placas de colecta, se correspondieron con taxa de sucesión temprana en la formación del arrecife (Vargas-Ángel *et al.*, 2015). Estos fueron los primeros organismos en depositarse en un área estéril (las placas de colecta) para la formación de un pequeño ecosistema en sucesión primaria. Para que se formen estructuras coralinas y este pequeño ecosistema pase a una sucesión secundaria es preciso de más tiempo, ya que organismos como los corales se desarrollan a un ritmo lento.

La mayor parte de la producción de CaCO₃ en los ecosistemas tropicales someros se le atribuye a los arrecifes por la formación de corales y algas coralinas costrosas (Lee *et al.*, 2001). Estas últimas, fueron las de mayor aporte de CaCO₃ en los biotopos estudiados, y superior en el arrecife con respecto al manglar. Las CCA desempeñan un papel fundamental en el desarrollo del arrecife, ya que atraen a las larvas de coral, sirven como fuente

de alimento a animales de arrecife y ayudan a remendar esqueletos de coral rotos creciendo entre las roturas (Kuffner *et al.*, 2013).

La gran diversidad biológica que podemos encontrar en un ecosistema marino-costero, suele tener buena parte de su origen en las complejas interacciones entre este y los ecosistemas vecinos. Las hojas secas y ramas de muchos de los árboles y arbustos que componen el bosque de manglar caen al agua espontáneamente o forzadas por las lluvias y el viento. Allí se disponen entre el enrejado de raíces donde son usadas como substrato, refugio e ingeridas como alimento por disímiles organismos hasta ser completamente destruidas con la ayuda de los organismos comedores de depósito, microorganismos y bacterias. Todo ello permite que estos fondos del manglar sean ricos en nutrientes derivados de la descomposición de la materia orgánica generada por el bosque y los organismos que en él habitan. Niveles más altos de nutrientes facilitan la proliferación de macroalgas de rápido crecimiento (e. j. algas de césped), que pueden superar fácilmente a los organismos calcificadores de arrecifes en cuanto a espacio y recursos (González-Ferrer *et al.*, 2015). Esto último explica que en el manglar el porcentaje de cobertura del grupo funcional césped, haya sido mayor que el del arrecife; así como también el bajo porcentaje de algas coralinas costrosas.

Bajo las raíces de los manglares se inmoviliza una gran cantidad de materia orgánica, sedimentos y sirven como áreas de reproducción y crianza de especies que forman parte del ecosistema del arrecife (Odum, 1998; González-Ferrer *et al.*, 2015); lo que explica las incrustaciones de huevos de invertebrados en las placas expuestas en el manglar, correspondientes al grupo funcional Sin calcio. La erosión del material acumulado por las raíces de los mangles debido a las olas y las mareas favorece el incremento de los sedimentos suspendidos en la columna de agua, lo que justifica el porcentaje de sedimento encontrado en las placas del manglar.

Del análisis de la mineralogía de CaCO_3 de los grupos funcionales, se obtuvieron dos formas cristalinas

de CaCO_3 , la aragonita (correspondiente al grupo CaCO_3 /sedimento) y la magnesita, polimorfo de carbonato de calcio dominante en los dos sitios de muestreo. Esto es de esperar, ya que las CCA, que precipitan la magnesita, representaron el principal grupo de organismos calcificadores adherido a las placas de colecta.

La magnesita es la forma más soluble de CaCO_3 biogénico, haciendo que las algas coralinas se encuentren entre los taxa de arrecifes de coral más susceptibles a la acidificación del océano (Morse *et al.*, 2007; Jokiel *et al.*, 2008). En condiciones acidificadas, las CCA pueden perder su ventaja competitiva como organismos calcificadores dominantes de la comunidad en sucesión temprana del arrecife, impidiendo el desarrollo y crecimiento del mismo. Entonces, en base a las razones anteriormente expuestas puede considerarse a las CCA como los organismos calcificadores más vulnerable a los efectos de la acidificación del mar, en el área estudiada.

Consideraciones finales

Utilizando la metodología de unidades de acreción se determinaron las tasas de acreción de calcificación en ecosistemas del complejo arrecifal de la Ensenada Rancho Luna. Mayores valores de tasas de acreción de calcificación se obtuvieron en el arrecife con respecto al manglar, lo que responde a las diferencias en las condiciones naturales típicas de estos sitios.

Seis taxas correspondientes a cuatro grupos funcionales fueron identificados en el área, de ellos, el grupo funcional de las algas costrosas coralinas fueron el grupo más abundante y las mayores aportadoras de carbonato de calcio en esta etapa de sucesión ecológica temprana.

Las algas coralinas costrosas precipitan la magnesita, por lo que, a partir de los resultados aquí obtenidos, de los organismos calcificadores presentes en la Ensenada Rancho Luna, las CCA, pueden considerarse particularmente vulnerables ante un escenario de acidificación del mar.

Agradecimientos

Esta investigación fue financiada por el proyecto MICATIN, del Programa Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación “Tecnologías de aplicaciones nucleares, la óptica, el láser y la ultrasónica para producir y generalizar bienes y servicios”, y por el proyecto RLA/70 20 financiado por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) Agradecemos al Laboratorio de Ensayos Ambientales, del Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos (CEAC), por su colaboración en el procesamiento de las placas y al centro de buceo de Rancho Luna por su valioso apoyo en los muestreos y el cuidado de los dispositivos.

Declaraciones

Contribución de autores

Conceptualización: MGB, LAAL; Ejecución de la investigación: LAAL, MGB, YHP; Curación de datos: LAAL, MGB; GLRA; Escritura – Original, LAAL; Escritura-Revisión y edición, YHP, MGB; Administración del proyecto, YHP.

Financiamiento

Investigación Financiada por el Programa Nacional de Ciencia Tecnología e Innovación “Tecnología de aplicaciones nucleares, la óptica, el laser y la ultrasónica para producir y generalizar bienes y servicios” a través del proyecto MICATIN y por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) a través del proyecto RLA/7/020

Conflicto de intereses

No existen conflicto de intereses financieros o no financieros que declarar que sean relevantes para el contenido del manuscrito.

Comportamiento ético

Se han seguido todas las recomendaciones aplicables tanto internacionales, nacionales como institucionales

relacionadas con el uso y manejo de animales para la investigación.

Permisos de muestreo y otros permisos:

El autor ha recibido de las autoridades pertinentes los permisos necesarios para realizar los muestreos.

Referencias

- Astor, Y., Guzman, L., Trocoli, L., Lorenzoni, L., Mueller-Karger, F. (2017). Síntesis de las tendencias de los parámetros oceanográficos y ópticos en la estación serie de tiempo CARIACO (enero 1996–diciembre 2013). *Mem. Fund. La Salle Cien. Nat.* 3(181-182), 81-101. (Disponible en: http://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev_mem/article/view/12692)
- Doney, S., Fabry, V., Feely, R., Kleypas, J. (2009). Ocean acidification: The other CO₂ problem. *Science*, 223, 169-192.
- Ellison, S. L. . and Williams, A. (2012): Eurachem/CITAC guide: Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement, Third edit. Gattuso, J., Martin, S., Cruz, H. (2009). Response of Mediterranean coralline algae to ocean acidification and elevated temperature. *Glob. Chang. Biol.*, 26-35.
- Gattuso, J. P., Magnan, A., Bille, R., Cheung, W. W., Howes, E. L., Joos, F., Allemand, D. Bopp, L., Cooley, R., Eakin, C. M., Hoegh-Guldberg, O., Kelly, R. P., Pörtner H.-O., Rogers D., Baxter J. M., Laffoley D., Osborn D., Rankovic A., Rochette J., Sumaila U. R., Treyer S. Turley, C. (2015). Contrasting futures for ocean and society from different anthropogenic CO₂ emissions scenarios. *Science*, 349, aac4722.
- Gazeau, F., Urbini, L., Cox, T. E., Gattuso, J. (2015). Comparison of the alkalinity and calcium anomaly techniques to estimate rates of net calcification. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 527, 1-12.
- Goldberg, W. (2013). *The biology of reef organisms*. University of Chicago Press, Chicago.
- González-Ferrer, S., Martínez, B., Cano, M. (2015). Manglares, pastos marinos y arrecifes coralinos. En L.

- Menéndez Correa, J.M. Guzmán (Eds.) *Ecosistemas de manglar en el archipiélago cubano*. (pp. 206-278 pp.), La Habana, Ed. Academia.
- IPCC (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II, and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (R. K. Pachauri, & L. A. Meyer, Eds.) Geneva, Switzerland: IPCC.
- Johnson M. D., Price N. N. & Smith J. E., (2022). Calcification accretion units (CAUs): a standardized approach for quantifying recruitment and calcium carbonate accretion in marine habitats. *Methods Ecol. Evol.*
- Jokiel, P. (2011). Ocean acidification and control of reef coral calcification by boundary layer limitation of proton flux. *Mar. Sci.* 87, 633-657.
- Jokiel, P., Rodgers, K., Kuffner, I., Andersson, A., Cox, E., Mackenzie, R. (2008). Ocean acidification and calcifying reef organisms: a mesocosm investigation. *Coral Reefs* 27: 473-483.
- Kuffner, I., Hickey, J. y Morriso, B. (2013) Calcification rates of the massive coral *Siderastrea siderea* and crustose coralline algae along the Florida Keys (USA) outer-reef tract. *Coral Reefs* 8: 1-16.
- Lee D., Carpenter S.J. (2001) Isotopic disequilibrium in marine calcareous algae. *Chem. Geol.*; 172: 307–329.
- Medellín, F., Cabral, F. A., López, A. y Calderón, L. (2016) Calcificación de las principales especies de corales constructoras de arrecifes en la costa del Pacífico del sur de México. *Cienc. Mar.* 42, 209-225.
- Melendez, M., & Salisbury, J. (2017). *Impacts of Ocean Acidification in the Coastal and Marine Environments of Caribbean Small Island Developing States (SIDS)*. Caribbean Marine Climate Change Report Card: Science Review.
- Morse J.W., Arvidson R.S., Luttge A. (2007) Calcium carbonate formation and dissolution. *Chem. Rev.* 107, 342-381.
- Odum, E. (1998). Desarrollo del Ecosistema y Evolución. En *Ecología* (pp.185-207). Compañía Editorial Continental SA. Vigésima. México,
- Price N.N., Martz T.R., Brainard R.E., Smith J.E. (2012). Diel Variability in Seawater pH Relates to Calcification and Benthic Community Structure on Coral Reefs. *PLoS One*, 7(8), 2-15.
- Randi, C. B., Becker, A. C., Willems, M. J., Perry, C. T., Salgado, L. T., de Carvalho, R. T., ... & Pereira-Filho, G. H. (2021). Calcium carbonate production in the southernmost subtropical Atlantic coral reef. *Mar. Environ. Res.*, 172, 105490.
- Reis, V. M. D., Karez, C. S., Mariath, R., de Moraes, F. C., de Carvalho, R. T., Brasileiro, P. S., ... & Amado-Filho, G. M. (2016). Carbonate production by benthic communities on shallow coralline reefs of Abrolhos Bank, Brazil. *PLoS One*, 11(4), e0154417.
- Sabine, C. L., Feely, R., Gruber, N., Key, R., Lee, K. y Bullister, J. (2004). Oceanic Sink for Anthropogenic CO₂. *Science*, 305, 367-371.
- Smith, A. M., Sutherland, J., Kregting, L., Winter, D. J. (2012) Phylomineralogy of the coralline red algae: correlation of skeletal mineralogy with molecular phylogeny. *Phytochemistry*, 81, 97-108.
- Tucker, M. E., Wright, V. P. (1990). Carbonate sedimentology. Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- Vargas-Ángel B., Richards C.L., Vroom P.S., Price N.N., Schils T., Young C.W. (2015). Baseline Assessment of Net Calcium Carbonate Accretion Rates on U.S. Pacific Reefs. *PLoS ONE*, 10, 12.

Como citar este artículo

Aragón-López, L.A., Gómez-Batista, M., Rojas Abrahantes, G., Helguera Pedraza, Y. (2023). Tasas netas de acreción de carbonato de calcio en el complejo de ecosistemas marinos-costeros de la Ensenada Rancho Luna, Cienfuegos, Cuba. *Rev. Invest. Mar.*, 43(2), 68-79.

Material complementario

Tabla MC1. Porcentaje de cubrimiento de grupos funcionales en las unidades de acreción expuestas en el complejo arrecifal Ensenada Rancho Luna (Cuba). Se muestran valores medios con sus desviaciones estándar (DE) y su rango de variación entre los valores mínimos y máximos

| Grupos funcionales | Arrecife | | Manglar | |
|------------------------------------|------------------|---------------------|------------------|---------------------|
| | Media \pm DE | Rango (Mín. – Máx.) | Media \pm DE | Rango (Mín. – Máx.) |
| Algas costrosas coralinas (CCA) | 49.9 \pm 11.87 | (34.34 – 64.50) | 7.4 \pm 4.80 | (1.80 – 13.18) |
| CaCO ₃ /Sedimento | -- | -- | 3.5 \pm 4.45 | (0 – 11.01) |
| Césped (Turf) | 8.5 \pm 4.09 | (4.35 – 15.68) | 24.7 \pm 19.11 | (0 – 47.78) |
| Sin Calcio/Huevos de invertebrados | -- | -- | 9.7 \pm 5.05 | (2.40 – 15.37) |