

**PRODUCCIÓN DE CARBONO ORGÁNICO Y
CARBONATO DE CALCIO (CaCO₃) DE
ALGAS CALCÁREAS DE LOS GÉNEROS
HALIMEDA Y *PENICILLUS* (BRYOPSIDALES,
CHLOROPHYTA) EN SAN FELIPE, YUCATÁN,
MÉXICO**

TESIS

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OBTENER EL
GRADO DE**

**MAESTRO(A) EN CIENCIAS SOBRE EL
MANEJO Y CONSERVACIÓN DE RECURSOS
NATURALES TROPICALES**

POR

**Licenciada en Biología Marina
Andrea Concepción Chuc Contreras**

Asesores

Dra. Ileana Ortegón Aznar

Dra. Ligia Collado-Vides

Mérida, Yuc., México, 29 febrero del 2016

Declaratoria de originalidad

“El presente trabajo no ha sido aceptado o empleado para el otorgamiento de título o grado diferente o adicional al actual. La tesis es resultado de las investigaciones del autor, excepto donde se indican las fuentes de información consultadas. El autor otorga su consentimiento a la UADY para la reproducción del documento con el fin del intercambio bibliotecario siempre y cuando se indique la fuente”.

Resumen

Las algas verdes calcáreas se encuentran ampliamente distribuidas en litoral de la costa norte de la Península de Yucatán y son importantes productoras de sedimento carbonatado y sumideros de carbono. Del 2014 al 2015, se realizaron cuatro muestreos cada tres meses en dos sitios de San Felipe, Yucatán para estimar la biomasa, tasa de crecimiento y producción, así como su proporción de CaCO_3 de algas calcáreas verdes del género *Halimeda* y *Penicillus*. Para calcular la producción y su proporción de CaCO_3 , se estimó la biomasa por medio de cuadrantes (50 x 50 cm) y se midió en peso seco por área y especie. La tasa de crecimiento se estimó por medio de la técnica de Alizarina-S que determinó la cantidad de nuevo material producido por día en g/día. La proporción de CaCO_3 se obtuvo de la quema de las muestras, donde CaCO_3 es el peso de cenizas. El promedio anual de biomasa fue 1,087.2 g/m² donde 88% fue CaCO_3 , la tasa de crecimiento fue 77.307 g/año del cual el 52% (40.478 g/año) fueron CaCO_3 , la producción fue de 1084.269 g/m²/año del cual el 85% (896.920 g/m²/año) fue CaCO_3 . La biomasa, tasa de crecimiento y producción mostraron una variación estacional entre especies donde junio y septiembre se detectó la mayor producción y en diciembre la menor. *Halimeda opuntia* presentó la mayor biomasa, tasa de crecimiento (0.154 g/día) y producción (737.80 g/m²/año). Estos datos son mayores a los reportados en el Caribe. Se determinó que existen diferencias significativas en la biomasa, tasa de crecimiento y la producción por sitio y meses de muestreo, encontrando una posible relación entre la producción de estas algas con las temporadas climáticas. Los resultados muestran que esta área es importante en la producción de sedimentos carbonatados y es un área de alta productividad. Este estudio muestra que *Halimeda opuntia* representa más del 60% de la producción total de CaCO_3 . Se recomienda establecer un monitoreo a largo plazo para detectar sus fluctuaciones naturales a lo largo del tiempo y las posibles interacciones que puedan estar sucediendo. Es primordial expandir el área de muestreo para conocer zonas claves de producción y sedimentación de carbono, en la zona costera de Yucatán.

Palabras clave: Algas verdes calcáreas, carbono orgánico, CaCO_3 , Yucatán.

Abstract

Calcareous green algae are widely distributed in coastal north coast of the Yucatan Peninsula and are important producers of carbonated sediment and carbon sinks. From 2014 to 2015, four samplings were conducted every three months in two sites of San Felipe for estimating biomass, growth rate and production, and the proportion of CaCO₃ calcareous green algae of the genus *Halimeda* and *Penicillus*. To calculate the proportion of production and CaCO₃, biomass was estimated by quadrants (50 x 50 cm) and dry weight was measured by species per area. The growth rate was estimated by the Alizarin-S technique which determined the amount of new material produced per day in g/day. The proportion of CaCO₃ was obtained from burning samples where CaCO₃ is the ash weight. The average annual biomass was 1087.2 g/m² which was 88% CaCO₃, the growth rate was 77,307 g/year of which 52% (40,478 g/year) were CaCO₃, production was 1084,269 g/m²/year which 85% (896 920 g/m²/year) was CaCO₃. Biomass, growth rate and production showed a seasonal variation between species where June and September increased production was detected in December and the lowest. *Halimeda opuntia* had the highest biomass, growth rate (0.154 g/day) and production (737.80 g/m²/year). These figures are higher than those reported in other areas of the Caribbean. It was determined that there are significant differences in biomass, growth rate and production per site and sampling months, finding a possible link between the production of these algae with climatic seasons. The results show that this area is important in producing carbonate sediments and is an area of high productivity. This study shows that *Halimeda opuntia* represents over 60% of total production CaCO₃. It is recommended to establish a long-term monitoring to detect natural fluctuations over time and possible interactions that may be happening. It is essential to expand the sampling area to explore key areas of production and carbon sedimentation in the coastal area of Yucatan.

Keywords: green calcareous algae, organic carbon, CaO₃, Yucatán

Índice.

1. Introducción	1
2. Marco teórico	4
2.2 Género Halimeda	5
2.2.1. Calcificación en Halimeda.....	6
2.3 Calcificación en Penicillus.....	7
2.4. Calcificación y crecimiento	9
3. Objetivos.....	12
Objetivo general.....	12
Objetivos específicos.	12
Bibliografía	13
Artículo I- Variación Temporal de la Biomasa y Proporción de Carbono Orgánico y CaCO₃ en las Algas Calcáreas Verdes Halimeda y Penicillus (Bryopsidales, Chlorophyta) en San Felipe, Yucatán, México.....	18
Resumen.....	18
Introducción	19
Materiales y Métodos.....	20
Resultados.....	22
Discusión	27
Referencias.....	30
Artículo II- Variación Espacio Temporal del Crecimiento y Producción de Carbono Orgánico y CaCO₃ de las Algas Calcáreas Verdes Halimeda Y Penicillus (Bryopsidales, Chlorophyta): en San Felipe, Yucatán, México.....	33
Resumen.....	33
Introducción	34
Materiales y Métodos.....	35
Resultados.....	39

Tasa de crecimiento	39
Producción	43
Discusión	47
Referencias.....	50
Discusión General	54
Conclusión General	55

Índice de Figuras

Figura 1. (a) Anatomía externa de <i>Halimeda</i>	6
Figura 2. Proceso de calcificación intercelular en <i>Halimeda</i>	7
Figura 3. Anatomía de <i>Penicillus</i>	8
Artículo I- Variación Temporal de la Biomasa y Proporción de Carbono Orgánico y CaCO_3 en las Algas Calcáreas Verdes <i>Halimeda</i> y <i>Penicillus</i> (Bryopsidales, Chlorophyta) en San Felipe, Yucatán, México.	18
Figura 1. Vista satelital de los puntos de muestreo en “Isla Cerritos”-San Felipe. ...	21
Figura 2. Biomasa total de las algas verdes calcáreas y su proporción de CaCO_3 y Corg por mes de muestreo.....	23
Figura 3. Biomasa total por mes, y su proporción en CaCO_3 y Corg..	23
Figura 4. Biomasa total de las algas calcáreas verdes <i>Halimeda opuntia</i> , <i>Penicillus dumetosus</i> y <i>Halimeda incrassata</i>	24
Figura 5. Biomasa de <i>Halimeda opuntia</i> por mes y por sitio	26
Figura 6. Biomasa de <i>Penicillus dumetosus</i> por mes y por sitio	26
Figura 7. Biomasa de <i>Halimeda incrassata</i> por mes y por sitio	27
Artículo II- Variación Espacio Temporal del Crecimiento y Producción de Carbono Orgánico y CaCO_3 de las Algas Calcáreas Verdes <i>Halimeda</i> y <i>Penicillus</i> (Bryopsidales, Chlorophyta): en San Felipe, Yucatán, México.....	33
Figura 1. Vista satelital de los puntos de muestreo en “Isla Cerritos”-San Felipe. ..	36
Figura 2. a) Fijación del alga al sustrato y a la bolsa con la tinción de alizarina-S, b) liberación de la alizarina-S en la bolsa para el proceso de tinción.....	37
Figura 3. Nuevos segmentos de <i>Halimeda incrassata</i> al día 10 del experimento.	37
Figura 4. Tasa de crecimiento al año de las especie de algas calcáreas verdes de “Isla Cerritos”.	39
Figura 5. Tasa de crecimiento al día por mes de las algas calcáreas verdes de “Isla Cerritos”.	40

Figura 6. Tasa de crecimiento al año de las algas calcáreas verdes en Cerritos 1 y Cerritos 2.....	41
Figura 7. Tasa de crecimiento por día de las algas verdes calcáreas en los sitios de muestreo: Cerritos 1 y Cerritos 2.	42
Figura 8. Tasa de crecimiento por mes de las algas verdes calcáreas en los sitios de muestreo: Cerritos 1 y Cerritos 2.	43
Figura 9. Producción anual de las especie de algas calcáreas verdes de “Isla Cerritos”.....	44
Figura 10. Producción por mes de las algas calcáreas verdes de “Isla Cerritos”.	44
Figura 11. Producción por sitio de las algas calcáreas verdes de “Isla Cerritos”.	45
Figura 12. Producción por día de las algas verdes calcáreas en los dos sitios de muestreo: Cerritos 1 y Cerritos 2.	46
Figura 13. Producción por día de las algas verdes calcáreas en los dos sitios de muestreo: Cerritos 1 y Cerritos 2.	46

1. Introducción

El cambio climático y la acidificación del océano son las principales amenazas que enfrentan las algas calcáreas verdes. Las algas verdes calcáreas de los géneros *Halimeda* y *Penicillus* son muy importantes en el ecosistema marino, no sólo por ser productores de sedimentos y recicladores de CO₂ (Littler, 1976), sino por ser altamente vulnerables a los cambios en el ambiente. Estas algas son sensibles a los efectos de la acidificación del océano en su producción primaria y tasa de calcificación (Hartley *et al.*, 1997; Barry *et al.*, 2013; Koch *et al.*, 2013).

Las macroalgas son importantes en el ecosistema marino, ya que sirven de alimento y refugio a peces e invertebrados, modifican los fondos marinos al fijar los sustratos por medio de sus rizoides, enriquecen las aguas con oxígeno y aportan nutrientes (Wray, 1971; Littler, 1972; Bak, 1976; Adey, 1998). La característica adaptativa que tienen algunas algas marinas de incorporar carbonato de calcio a sus células hace de estas algas organismos estructurales de su hábitat.

Las algas *Halimeda* y *Penicillus* se caracterizan por incorporar carbonato de calcio (CaCO₃) en su tejido. Esta capacidad les proporciona un cuerpo semirrígido calificado que tiene como resultado la producción de sedimentos calcáreos cuando el alga muere. Como consecuencia, las algas calcáreas verdes son productores importantes de sedimentos marinos y contribuyen a la acumulación de arena y formación de los arrecifes (Hillis-Colinvaux, 1980; Davies y Marshall, 1985; Díaz-Pulido *et al.*, 2007).

El alga *Halimeda* puede contribuir 8% a la producción de carbonato total mundial (Hillis, 1997) ya que más del 80% de su biomasa total corresponde a CaCO₃ (Collado-Vides *et al.*, 2005, 2007). Sin embargo, la producción de CaCO₃ puede variar dependiendo de las diferentes regiones. Por ejemplo, se ha registrado una producción anual de *Halimeda* en Puerto Morelos, Quintana Roo de 815 g/m² de CaCO₃ (van Tussenbroek y van Dijk, 2007) mientras que en Panamá puede ser de 2,323 g/m² de CaCO₃ al año (Freile y Hillis, 1997).

La producción de CaCO_3 de algas calcáreas verdes se ve influenciada por la estacionalidad, con una mayor producción de CaCO_3 durante el verano y bajas en el invierno. Esto se debe a que la tasa de calcificación es directamente proporcional a la fotosíntesis, incrementando su tasa de calcificación en los meses con mayor exposición de luz (Borowitzka y Larkum, 1976). La producción se puede evaluar a nivel de género o como grupo funcional; sin embargo, si se evalúan las algas calcáreas verdes a nivel de género, se puede detectar las variaciones que se presentan en la producción de CaCO_3 , la cual no es posible detectar cuando se analizan todos los géneros como un grupo funcional (Collado-Vides *et al.*, 2005). Las algas *Halimeda* y *Penicillus* poseen distintos grados de tolerancia a los factores fisicoquímicos, como la salinidad, ya que se ha encontrado que *Halimeda* se distribuye en ambientes completamente marinos, a diferencia de *Penicillus* que puede distribuirse en ambientes marinos y estuarinos (Collado-Vides *et al.*, 2005, Collado-Vides *et al.*, 2011).

Los cambios de los factores fisicoquímicos, como el aumento del dióxido de carbono (CO_2), la disminución del pH y el aumento de la temperatura afectan la calcificación de las algas calcáreas como *Halimeda* y *Penicillus* (Andersson *et al.*, 2005), el aumento en la temperatura de hasta 32°C las pondría al límite de su tolerancia para su supervivencia, haciéndolas altamente vulnerables a los futuros escenarios de cambio climático previstos de temperatura elevada y acidificación del océano (Sinutok *et al.*, 2012).

Los trabajos realizados hasta el momento en torno a las macroalgas del sureste del Golfo de México brindan información principalmente sobre la composición de especies; sin embargo, no existen trabajos que calculen la producción de carbono orgánico (Corg), CaCO_3 y determinen la tasa de crecimiento de las algas calcáreas de los géneros *Halimeda* y *Penicillus* y destaquen su función como especies formadoras de arenas y fijadoras de carbono.

El objetivo de este estudio es calcular la producción de carbono, y su proporción en Corg y el CaCO_3 de las algas *Halimeda* y *Penicillus*, como especies fijadoras de carbón y formadoras de arenas y relacionarlas con factores ambientales.

Se determinó su abundancia y crecimiento, así como su variación espacial y temporal en dos sitios de Isla Cerritos, San Felipe, Yucatán. Los resultados proveen una primera línea base sobre la producción de las algas calcáreas en el Sureste del Golfo de México, estableciendo un punto de referencia para poder establecer posibles estrategias de manejo de la zona.

2. Marco teórico

Las algas bentónicas son organismos muy diversos y complejos que habitan una amplia variedad de hábitats, como arrecifes de coral, fondos arenosos, praderas de pastos marinos, manglares y zonas intermareales rocosas (Barsanti y Gualtieri, 2006). En términos generales, las macroalgas comprenden tres Divisiones: Rhodophyta (algas rojas), Heterokontophyta (Phaeophyceae, algas pardas) y Chlorophyta (algas verdes) (Littler y Littler, 2000).

Las algas verdes calcáreas, como las del género *Halimeda*, son importantes calcificadoras en el ecosistema marino. Éstas contribuyen a la producción de arena y a la absorción de CO₂ (Littler, 1976). Se ha documentado que las algas altamente calcificadas están adaptadas fisiológicamente para soportar la luz intensa y soportar físicamente severas ondas de choque por oleaje y pastoreo, lo cual está relacionado con el tipo de ambiente en el que se les suele encontrar (Littler y Doty, 1975).

Los esquemas de distribución y abundancia de las algas son el reflejo de condiciones ambientales predominantes, de la dinámica de sus poblaciones y de las complejas relaciones ecológicas que se presentan entre las especies (Brown, 1995). La abundancia, distribución y dinámica espacial de las comunidades de algas son muy variables tanto latitudinal como longitudinalmente, los factores que influyen son diversos como, la luminosidad (intensidad y calidad), la salinidad, el sustrato, la acción del oleaje y flujos hídricos (Dawes, 1986).

La importancia de la intensidad y cantidad de la iluminación submarina es fundamental para las macroalgas (y algas en general), ya que rigen sus mecanismos fotosintéticos. La salinidad es un factor importante en muchos casos de distribución local de las algas marinas, debido a que las tasas fotosintéticas son afectadas por un alto o bajo nivel de salinidad, difiriendo por especie y según la estacionalidad (Dawes, 1986).

Otro factor que influye en su distribución y abundancia de las algas calcáreas es el sustrato a los que se adhieren o fijan. Estos son muy diversos y van desde estructuras sólidas firmes como los corales, rocas, estructuras artificiales, animales

acuáticos, pasando por sólidos granulares como arenas de diversas granulometrías, hasta blandos como los pastos y otras algas (Graham y Wilcox, 2000).

2.2 Género *Halimeda*

Las especies del género *Halimeda* son importantes productoras de sedimentos y reciclamiento de CO₂ en muchas regiones tropicales (Pizzimenti y Silva, 1997; Hillis, 2001). Son algas fotosintetizadoras y se pueden encontrar a profundidades de hasta 130 m (Littler *et al.*, 1985, 1986; Hillis-Colinvaux, 1986; Blair y Norris, 1988). Se ha demostrado que las algas verdes calcáreas presentan mayores abundancias en verano comparada con invierno (Collado-Vides *et al.*, 2005). Las especies de los géneros *Halimeda* se caracterizan por tener distribuciones espaciales diferentes respondiendo a factores ambientales, como la temperatura, salinidad y turbidez, presentando una menor abundancia en ambientes con limitación de fósforo y mayor influencia de agua dulce (Collado-Vides *et al.*, 2011).

El género *Halimeda* se caracteriza por presentar un talo con hábito segmentado desde su disco adhesivo, el alga crece en pulsos, en cada tiempo da lugar a un nuevo segmento, estos segmentos crecen en puntos ubicados en los bordes distales de cada segmento en la parte superior (Verbruggen y Kooistra, 2004). La forma en que se ramifican ocurre por lo general cuando dos o más segmentos hijos brotan desde el borde distal de un segmento y, posteriormente, cada uno da lugar a una rama. Estas ramificaciones pueden variar en número dependiendo de la especie (Hillis-Colinvaux, 1980).

El alga *Halimeda* ocupa muchos hábitats del entorno marino tropical y subtropical (Littler y Littler, 2000, 2003). Su hábitat se refleja en su morfología con una variedad de formas (Kooistra, 2002; Verbruggen *et al.*, 2005). Una de estas adaptaciones a los factores ambientales es su disco adhesivo que se compone de una masa de rizoides ramificados. Los rizoides se compactan en una masa densa, cerca del sustrato y la masa rizoide se extiende hacia el exterior en cierta medida, lo que resulta en un área de contacto relativamente grande entre el disco adhesivo y el sustrato (Fig. 1) (Verbruggen y Kooistra, 2004).

El género *Halimeda* posee ramas con células tubulares y por medio de la anastomosis forma talos. Dentro de cada segmento, se encuentran dos zonas de sifones organizados de manera diferente (ramas tubulares de células) de las cuales se puede discernir: una médula central y su corteza circundante (Fig. 1) (Verbruggen *et al.*, 2005).

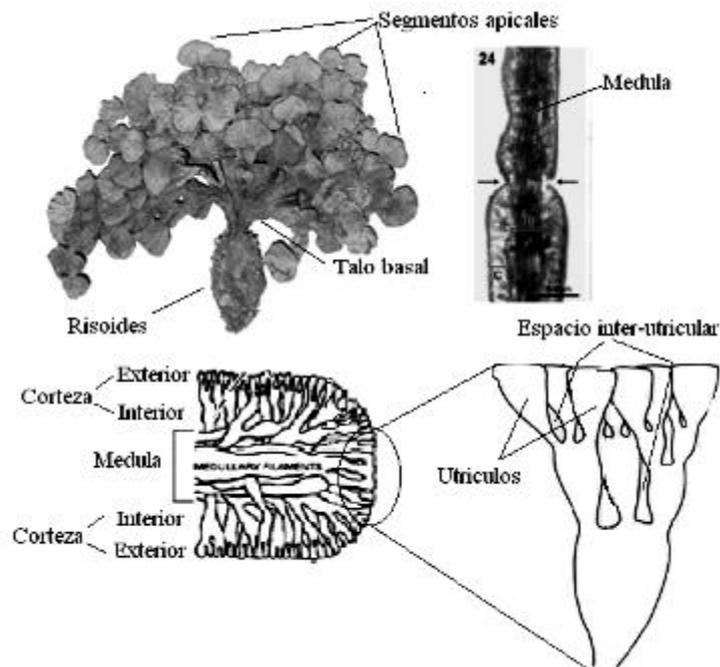


Figura 1. (a) Anatomía externa de *Halimeda*, (b) sección transversal de un segmento, (c) sección longitudinal del segmento apical (modificado de Robbins *et al.*, 2009).

2.2.1. Calcificación en *Halimeda*

La calcificación biogénica está estrechamente acoplada a la fotosíntesis, debido al cambio en el sistema de carbonato por absorción de CO_2 y el aumento análogo del pH, lo que mejora la precipitación de carbonato de calcio (Borowitzka, 1984; McConnaughey, 1987). En el género *Halimeda*, los cristales de aragonita se depositan en los espacios intercelulares (Borowitzka y Larkum, 1976) separados del agua de mar por una capa de células (utrículos), en la que se concentra la actividad fotosintética. Estos cristales de aragonita se calcifica en los espacios intercelulares donde ésta se ve reforzada por la absorción de CO_2 , la fotosíntesis y el intercambio de protones en las células adyacentes. En las células el CO_2 es absorbido aumentando

el pH en los espacios intercelulares, desplazando el equilibrio del carbonato CO_3^{2-} y favoreciendo la precipitación de CaCO_3 (Koch *et al.*, 2013) (Fig. 2).

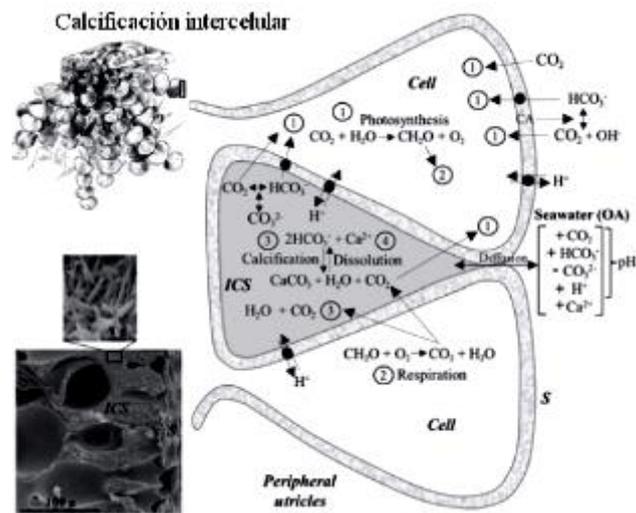


Figura 2. Proceso de calcificación intercelular en *Halimeda* (tomada de Koch *et al.*, 2013).

2.3. Calcificación en *Penicillus*

La calcificación en el género *Penicillus* se produce en forma de agujas de aragonita, que se precipitan entre la pared celular externa y la pared interna de la célula de la medula cortical y los filamentos capilares (Fig. 3C) (Ries, 2005). Los talos maduros de *Penicillus* pueden contener entre 25 y 59 % de su peso de aragonita. Esta calcificación tiene varias funciones uno de estos es que el alga al poseer esta rigidez en entornos hídricos turbulentos posee una mejor protección ante el impacto de las olas, al igual que la protección contra la depredación por pastoreo (Wray, 1977; Paul y Van Alstyne, 1988).

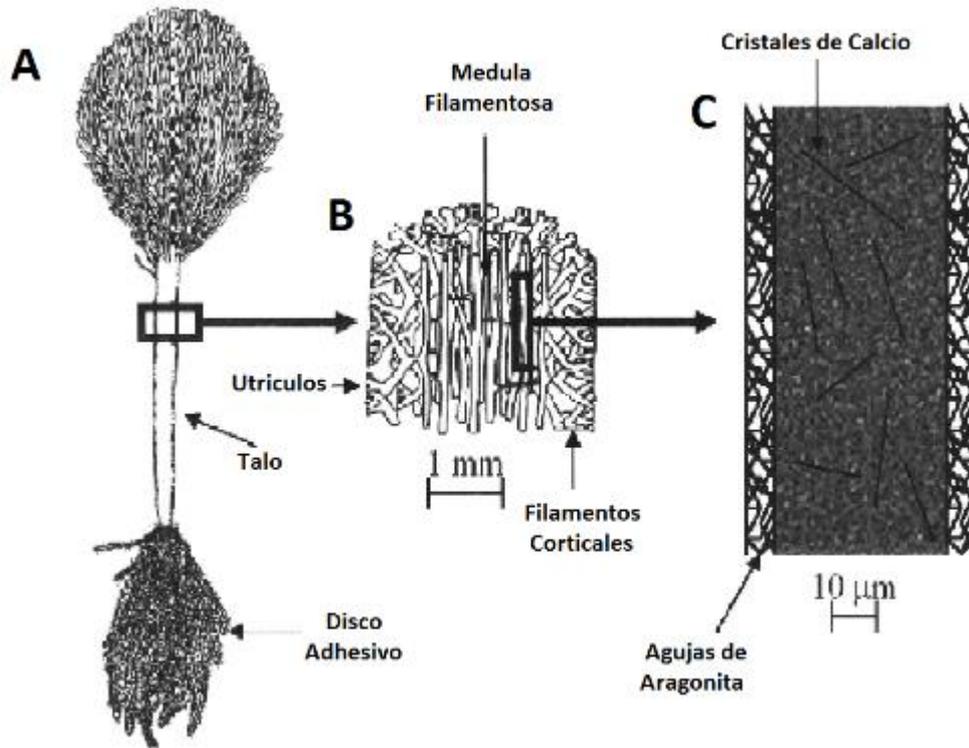


Figura 3. Anatomía de *Penicillus*. A) Cuerpo del alga con disco de fijación, B) Corte del talo mostrando los filamentos corticales, utrículos y medula, C) Corte de la medula filamentosa con agujas de aragonita (tomados de van den Hoek 1981).

Para determinar la producción en especies de *Halimeda* y *Penicillus* usualmente se utiliza el marcado de los segmentos de la rama o segmentos apicales (*in situ*) al inicio del estudio, y dejando los talos crecer durante un período determinado antes de la colecta. Una técnica de marcado comúnmente aplicada es la de teñir los segmentos erectos permanentes con el colorante rojo de alizarina-S (Wefer, 1980; Multer, 1988; Payri, 1988; Freile y Hillis, 1997; Vroom *et al.*, 2003). La tasa de crecimiento (expresado en gramos por día) se deriva de la relación de la cantidad de tejido viejo versus la cantidad de tejido nuevo y la producción de CaCO_3 se da, por la biomasa calcificada, el contenido de CaCO_3 y la tasa de crecimiento (van Tussenbroek y van Dijk, 2007). Es necesario por lo tanto conocer la biomasa del alga por unidad de área y determinar la tasa de crecimiento para así poder calcular la producción de CaCO_3 en gramos por m^2 al día (Productividad) (Borowitzka y Larkum, 1976a; Drew, 1983; Freile y Hillis, 1997; Collado-Vides *et al.*, 2005; van Tussenbroek y van Dijk, 2007).

2.4. Calcificación y crecimiento

Actualmente, la mayor parte de los estudios de biomasa, producción de Corg, CaCO₃ y los posibles efectos de la acidificación del océano en los procesos de calcificación de las algas calcáreas verdes se centran en el género *Halimeda*. Estos estudios en su mayoría han sido realizados en el mar del Caribe (Bach, 1979; Drew, 1983; Drew y Abel, 1985; Garrigue, 1991; Payri, 1988; van Tussenbroek y van Dijk, 2007; Borowitzka y Larkum, 1976; De Beer y Larkum, 2001; Collado-Vides *et al.*, 2005; Ries, 2009b; Robbins *et al.*, 2009; Sinutok *et al.*, 2013; Hofmann *et al.*, 2014)

Wefer (1980) estimó la producción y deposición de CaCO₃ de las algas *Halimeda incrassata*, *Penicillus capitatus* y *Padina sanctae-crucis*, mediante la tinción de sus segmentos viejos y pesado de los nuevos, en un período de 27 días de crecimiento, encontrando que la producción es de 50 (*Halimeda incrassata*), 30 (*Penicillus capitatus*) y 240 (*Padina sanctae-crucis*) g/m² al año de carbonato de calcio. Las tasas de crecimiento medidos sugieren que las algas renuevan su población permanente de aproximadamente una vez al mes (*Halimeda* y *Padina*) o una vez cada mes y medio (*Penicillus*) durante su temporada de crecimiento.

Davis y Fourqurean (2001) evaluaron las interacciones interespecíficas que operan entre el pasto marino (*Thalassia testudinum*) y una macroalga rizofítica (*Halimeda incrassata*), dentro de una comunidad de pastos marinos madura. Los tratamientos consistieron en la manipulación de la densidad de *T. testudinum* y *H. incrassata*, en un período de cuatro meses. Encontrando que la presencia de pastos marinos reduce el tamaño de los talos de algas en un 20.4% y la tasa de crecimiento de macroalgas en un 33.3%, pero la presencia de macroalgas no tuvo un impacto significativo sobre *T. testudinum*. Así mismo se observó que uno de los mecanismos que interviene en esta interacción es la competencia por nitrógeno (N).

Vroom *et al.* (2003) observaron las poblaciones de *Halimeda* en los Cayos de Florida encontrando que existen fluctuaciones anuales en las densidades de las poblaciones y que estas variaciones pueden ser causadas por la reproducción sexual y el crecimiento excesivo de algas epífitas.

Beach *et al.* (2003) evaluaron la productividad de *Halimeda opuntia* y *H. tuna* en los Cayos de Florida durante cinco años y el efecto de la profundidad y los cambios ambientales en esta. Encontrando que la productividad varió entre especies, con *H. opuntia* superior a la de *H. tuna*. A si mismo se observaron cambios en el crecimiento y la fotosíntesis, siendo uno de los principales causales la variabilidad en la disponibilidad de luz.

Collado-Vides *et al.* (2005) evaluaron la abundancia de los cuatro principales géneros de algas calcáreas verdes (*Udotea*, *Penicillus*, *Rhipocephalus*, y *Halimeda*) así como a manera de grupo morfo-funcional, encontrando que el contenido global de CaCO₃ de todas las muestras fue 86.4%. A su vez encontraron que los patrones estacionales están altamente sincronizados, con mayor abundancia durante el verano y abundancias bajas durante el invierno y encontraron que géneros presentes en el mismo sitio (con idéntica condición ambiental) reaccionaron de manera diferente en algunos casos; estas diferencias no eran posibles de detectar cuando se analizaron todos los géneros como un grupo morfo-funcional.

van Tussenbroek y van Dijk (2007) evaluaron la variabilidad anual e inter anual del crecimiento, biomasa y contenido de CaCO₃ en espacio y tiempo (1997 hasta 1999) de *Halimeda incrassata* en la laguna de Puerto Morelos Quintana Roo, encontrando diferencias en la biomasa entre estaciones de muestreo. El contenido de CaCO₃ de *H. incrassata* varió significativamente con el tiempo de muestreo aumentando en la primavera, alcanzando los valores más altos en verano, y disminuyendo en invierno, en cuanto a la variación inter anual no se encontraron patrón o tendencia en los datos. El contenido global de CaCO₃ de todas las muestras fue 86,4%, con una producción anual de 815 g/m² de CaCO₃.

Collado-Vides *et al.* (2010) exploraron la estructura comunitaria de las macroalgas en relación a la calidad del agua, encontrando que estas comunidades respondieron a la variación en la salinidad de la siguiente manera: (1) de baja salinidad, dominada por *Chara hornemannii* y una mezcla de algas filamentosas; (2) salobres, dominado por *Penicillus capitatus*, *Batophora oerstedii* y *Acetabularia*

schenkii; y (3) marino, dominada por *Halimeda incrassata* y *Anadyomene stellata* mostrando que *Penicillus* posee una alta tolerancia a cambios en la salinidad.

3. Objetivos

Objetivo general

Determinar la producción de carbono y su proporción en orgánico (Corg) e inorgánico (CaCO₃) de las algas del género *Halimeda* y *Penicillus*, espacial y temporalmente en San Felipe, Yucatán, México.

Objetivos específicos.

- Calcular la biomasa de algas verdes calcáreas del género *Halimeda* y *Penicillus*, su variación espacio-temporal e identificar la proporción de CaCO₃ y Corg.
- Calcular la tasa de crecimiento de algas verdes calcáreas del género *Halimeda* y *Penicillus*, su variación espacio-temporal e identificar la proporción de CaCO₃ y Corg.
- Estimar la producción y variación espacio-temporal de CaCO₃ y Corg, de las algas calcáreas verdes.

Bibliografía

Adey, W.H. 1998. Coral reefs: algal structured and mediated ecosystems in shallow, turbulent, alkaline waters. *Journal of Phycology* 34: 393-406.

Andersson, A.J., Mackenzie F.T., y Lerman, A. 2005. Coastal ocean and carbonate systems in the high CO₂ world of the Anthropocene. *American Journal of Science* 305(9): 875-918.

Bak, R.P.M. 1976. The growth of coral colonies and the importance of crustose coralline algae and burrowing sponges in relation with carbonate accumulation. *Netherlands Journal of Sea Research* 10: 285-337.

Barsanti, L., y Gualtieri P. 2006. *Algae: anatomy, biochemistry, and biotechnology*. CRC. Press. Taylor & Francis Group 251-288.

Beach, K.L., Walters P., Vroom C., Smith J., Coyer y Hunter C. 2003. Variability in the ecophysiology of *Halimeda* sp. (chlorophyta, bryopsidales) on conch reef, Florida Keys, USA1: *Journal of Phycology* 39: 633-643.

Blair S.M. y Norris J.N. 1988. The deep-water species of *Halimeda lamouroux* (*Halimedaceae*, Chlorophyta) from San Salvador Island, Bahamas: species composition, distribution and depth records. *Coral Reefs* 6: 227-236.

Borowitzka M.A. y Larkum A.W.D. 1976. Calcification in the green algae *Halimeda*. I. An ultrastructure study of thallus development. *Journal of Phycology* 13: 6-16.

Borowitzka, M.A. 1984. Calcification in aquatic plants. *Plant, Cell and Environment* 7: 457-466.

Brown, J.H. 1995. *Macroecology*. The University of Chicago Press, Chicago and London, 10-25.

Collado-Vides, L., Caccia, V.G., Boyer, J.N., y Fourqurean, J.W. 2007. Tropical seagrass-associated macroalgae distributions and trends relative to water quality. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 73(3): 680-694.

Collado-Vides L., Mazzei V., Thyberg T., y Lirman D. 2010. Development of a macroalgal indicator of salinity patterns in Biscayne Bay. Greater Everglades Ecosystem Restoration. July 2010 Naples Fl.

Collado-Vides, L., Mazzei V., Thyberg T. y Lirman D. 2011. Spatio-temporal patterns and nutrient status of macroalgae in a heavily managed region of Biscayne Bay, Florida, USA. *Botanica Marina* 54: 377-390.

Collado-Vides L., Rutten L.M. y Fourqurean J.W. 2005. Spatiotemporal variation of the abundance of calcareous green macroalgae in the Florida Keys: a study of synchrony within a macroalgal functional-form group. *Journal of Phycology* 41:742-752.

Davies, P.J. y Marshall J.F. 1985. *Halimeda* bioherms—low energy reefs, northern Great Barrier Reef. *Proceedings of the Fifth International Coral Reef Congress* 1: 1-7.

Davis, B.C. y Fourqurean, J.W. 2001. Competition between the tropical alga, *Halimeda incrassata*, and the seagrass, *Thalassia testudinum*. *Aquatic Botany* 71(3): 217-232.

Dawes, C. 1986. *Ecología y fisiología: conceptos y métodos*. *Botánica Marina*. Ed. Limusa México, D.F. 673.

Díaz-Pulido, G., McCook, L.J., Larkum, A.WD., Lotze, H.K., Raven, J.A., Schaffelke, B., Smith, J.E. y Steneck, R.S. 2007. Vulnerability of macroalgae of the Great Barrier Reef to climate change. In *Climate Change and the Great Barrier Reef*. J.E. Johnson & P.A. Marshall, Eds.: 154-192.

Drew, E.A. 1983. *Halimeda* biomass, growth rates and sediment generation on reefs in the central Great Barrier Reef Province. *Coral Reefs* 2: 101–10.

Freile D. y Hillis L. 1997. Carbonate productivity by *Halimeda incrassata* in a land proximal lagoon, Pico Feo, San Blas, Panama. In *Proceedings of the 8th International Coral Reef Symposium* 1: 767-772.

Graham L.K. y Wilcox L.W. 2000. The origin of alternation of generations in land plants: a focus on matrotrophy and hexose transport. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences* 355(1398): 757-767.

Hillis L. 1997. Coral reefs from a calcareous green alga perspective, and a first carbonate budget. *Proc. In Proceedings of the 8th International Coral Reef Symposium* 1: 761-766.

Hillis-Colinvaux L. 1980. Ecology and taxonomy of *Halimeda*: primary producers of coral reefs. *Advances in Marine Biology* 17: 1–327.

Hillis-Colinvaux L. 1986. *Halimeda* growth and diversity on the deep fore-reef of Eniwetak Atoll, *Coral Reefs* 5:19-21.

Koch M., Bowes G., Ross C. y Zhang X.H. 2013. Climate change and ocean acidification effects on seagrasses and marine macroalgae: *Global Change Biology* 19: 103-132.

Kooistra W.H.C.F. 2002. Molecular phylogenies of Udoteaceae (Bryopsidales, Chlorophyta) reveal non-monophyly for *Udotea*, *Penicillus* and *Chlorodesmis*. *Phycologia* 41: 453-462.

Littler D.S. y Littler M.M. 2003. South Pacific reef plants. A diver's guide to the plant life of South Pacific coral reefs. Off Shore Graphics, Washington. 331.

Littler M.M. 1972. The crustose corallinaceae. *Oceanography and Marine Biology* 10: 311-347.

Littler M.M. 1976. Calcification and its role among the macroalgae. *Micronesica* 12:27-41.

Littler M.M. y Littler D.S. 2000. Caribbean reef plants. Offshore Graphics, Washington D.C. 542.

Littler M.M., Littler D.S., Blair S.M. y Norris J.N. 1986. Deepwater plant communities from an uncharted seamount off San Salvador Island, Bahamas: distribution, abundance, and primary productivity. *Deep Sea Research* 33: 881–892.

Littler M.M., Littler D.S., Blair S.M. y Norris J.N. 1985. Deepest known plant life discovered on an uncharted seamount. *Science* 22: 57–59.

Littler, M.M. y Doty M.S. 1975. Ecological components structuring the seaward edges of tropical Pacific reefs: the distribution, communities and productivity of Porolithon. *Journal of Ecology* 63:117-129.

McConnaughey T.D. 1987. Biomineralization mechanisms. In origin, evolution and modern aspects of biomineralization in plants and animals. Springer US 57-73.

Multer H.G. 1988. Growth rate, ultrastructure and sediment contribution of *Halimeda incrassata* and *Halimeda monile*, Nonsuch and Falmouth Bays, Antigua, WI. *Coral Reefs* 6(3-4): 179-186.

Paul V.J. y van Alstyne K.L. 1988. Chemical and morphological antiherbivore defenses in *Halimeda* (Chlorophyta). *Proceedings of the 6th International Coral Reefs Symposium* 3:133-138.

Payri C.E. 1988. *Halimeda* contribution to organic and inorganic production in a Tahitian reef system. *Coral Reefs* 6: 251-62.

Pizzimenti P.B. y Silva J. 1997. Stress-strain behavior of surficial carbonate sediments from Key West, Florida, U.S.A. *Mar. Georesources Geotechnol* 15: 335-362.

Robbins L.L., Knorr P.O. y Hallock P. 2009. Response of *Halimeda* to ocean acidification: field and laboratory evidence. *Biogeosciences Discuss* 6: 4895-4918.

Sinutok S., Hill R., Doblin M.A., Wuhrer R. y Ralpa P.J. 2012. Warmer more acidic conditions cause decreased productivity and calcification in subtropical coral reef sediment-dwelling calcifiers. *Limnology and Oceanography* 56(4): 1200-1212.

- van den Hoek C. 1981. Chlorophyta: morphology and classification. Pp. 86-132 in C. S. Lobban, and M. J. Wynne, eds. The biology of seaweeds. University of California Press, Berkeley.
- van Tussenbroek, B.I. y van Dijk J.K. 2007. Spatial and temporal variability in biomass and production of Psammophytic *Halimeda incrassata* (bryopsidales, chlorophyta) in a Caribbean reef lagoon. *Journal of Phycology* 43: 69-77.
- Verbruggen H., de Clerck O., Schils T., Kooistra W.H.C.F. y Coppejans E. 2005. Evolution and phylogeography of *Halimeda* section *Halimeda* (Bryopsidales, Chlorophyta). *Molecular Phylogenetics and Evolution* 37: 789-803.
- Verbruggen, H. y Kooistra W.H.C.F. 2004. Morphological characterization of lineages within the calciWed tropical seaweed genus *Halimeda* (Bryopsidales, Chlorophyta). *European Journal of Phycology* 39: 213-228.
- Verbruggen, H., de Clerck O., Cocquyt E., Kooistra W.H.C.F. y Coppejans E. 2005. Morphometric taxonomy of siphonous green algae: a methodological study within the genus *Halimeda* (bryopsidales). *Journal of Phycology* 41: 126-139.
- Vroom P.S., Smith C.M., Coyer J.A., Walters L.J., Hunter C.L., Beach K.S. y Smith J.E. 2003. Field biology of *Halimeda tuna* (Bryopsidales, Chlorophyta) across a depth gradient: comparative growth, survivorship, recruitment, and reproduction. *Hydrobiologia* 501: 149-166.
- Wefer G. 1980. Carbonate production by algae *Halimeda*, *Penicillus* and *Padina*. *Nature* 285: 323-4.
- Wray J.L. 1971. Algae in reefs through time. *Proceedings of the North American Palaeontological Convention*. p. 1358-1373. IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

Variación Espacial y Temporal de la Biomasa y Proporción de Carbono Orgánico y CaCO₃ en las Algas Calcáreas Verdes *Halimeda* y *Penicillus* (Bryopsidales, Chlorophyta) en San Felipe, Yucatán, México.

Chuc-Contreras Andrea¹, Ortegón-Aznar Ileana¹ y Collado-Vides Ligia².

¹. Departamento de Recursos Marinos, CCBA. Universidad Autónoma de Yucatán. C.P. 97100. Mérida Yucatán México. chucontreras@gmail.com; ². Department of Biological Sciences, and Southeast Environmental Research Center, Florida International University, Miami, FL 33199, USA.

Resumen

Las algas verdes calcáreas se encuentran ampliamente distribuidas en litoral de la costa norte de la Península de Yucatán y son importantes productoras de sedimento carbonatado y sumideros de carbono. Durante los años del 2014 al 2015, se realizaron cuatro muestreos cada tres meses en dos sitios de San Felipe, Yucatán, México para estimar la biomasa (g/m²) y su proporción de CaCO₃ de algas calcáreas verdes del género *Halimeda* y *Penicillus*. El promedio anual de biomasa fue 1,087.2 g/m² donde 88% fue CaCO₃. La biomasa obtenida cada tres meses mostró una variación estacional entre especies, donde en junio y septiembre se detectó la mayor biomasa y en diciembre la menor. *Halimeda opuntia* presentó la mayor biomasa, marcando una diferencia entre los meses y los sitios. Entre los dos sitios, “Cerritos 2” fue el sitio con mayor biomasa (1,338.2 g/m²) al año. Estos resultados muestran una posible relación entre la biomasa y la estacionalidad de las algas verdes calcáreas y su importancia como productoras de carbono y sedimentos. Se recomienda establecer un monitoreo a largo plazo para evaluar las posibles interacciones que puedan estar marcando esta variación.

Palabras clave: Algas verdes calcáreas, carbono orgánico, CaO₃, Yucatán.

Nota: El texto fue elaborado de acuerdo con las normas editoriales de la revista BOTANICA MARINA.

Introducción

La zona costera es un ecosistema que produce y acumula grandes cantidades de carbono (C); inclusive en mayor cantidad que zonas forestales (Chmura *et al.* 2003, Bouillon *et al.* 2008, Fourqurean *et al.* 2012). Los organismos calcificadores, como las algas calcáreas (*Halimeda* y *Penicillus*), son importantes productores y acumuladores de carbono orgánico (Corg) y carbono inorgánico (CaCO₃). Sin embargo, son altamente vulnerables a los impactos del cambio climático (incremento del nivel del mar, aumento de temperatura y acidificación) (Hillis 1997, Collado-Vides *et al.* 2005, Díaz-Pulido *et al.* 2007).

Los géneros *Halimeda* y *Penicillus* se caracterizan por incorporar carbonato de calcio (CaCO₃) en su tejido por precipitación. Esto lo pueden lograr a través de la fotosíntesis debido al consumo de CO₂ para la producción de carbohidratos, lo cual reduce la cantidad de CO₂ en los tejidos e incrementa el pH de dentro de los sifones facilitando la precipitación de CaCO₃. Esta capacidad hace a estas algas uno de los más importantes secuestradores de carbono. Como consecuencia, las algas calcáreas verdes son productores importantes de sedimentos marinos y contribuyen al secuestro y deposición de carbono (Hillis-Colinvaux 1980, Davies y Marshall 1985, Díaz-Pulido *et al.* 2007).

Halimeda puede contribuir un 8% a la producción de carbonato total mundial (Hillis 1997) ya que más del 80% de su biomasa total corresponde a CaCO₃ (Collado-Vides *et al.* 2005, 2007). Sin embargo, la producción de CaCO₃ puede variar dependiendo de las diferentes regiones, registrándose una producción anual de *Halimeda* en Puerto Morelos, Quintana Roo de 815 g/m² de CaCO₃ (van Tussenbroek y van Dijk 2007) mientras que en Panamá puede ser de 2,323 g/m² de CaCO₃ al año (Freile y Hillis 1997). Esta producción de CaCO₃ biogénico las hace susceptibles a la disminución de los estados de saturación de carbonato, el aumento del dióxido de carbono (CO₂) y la disminución del pH en los mares. Las estimaciones disponibles indican que las tasas de calcificación en organismos marinos han disminuido de 11 a 44% desde la época preindustrial (Andersson *et al.* 2005), y se reducirá a 60 % durante el siglo XXI (Kleypas *et al.* 2006, Dupont *et al.* 2008).

Se ha estimado el carbono producido por algas calcáreas en el Caribe mexicano (van Tussenbroek y van Dijk 2007) y en zonas de Florida, E.U. (Collado-Vides *et al.* 2005, 2007). Sin embargo, no existen registros de trabajos donde se estime la biomasa (Tot-C) y su proporción de Corg y CaCO₃ para estas algas en el sureste del Golfo de México.

El objetivo de este trabajo es determinar espacial y temporalmente la biomasa de las algas verdes calcáreas del género *Halimeda* y *Penicillus* en la costa norte de la Península de Yucatán e identificar la proporción de Corg y CaCO₃.

Materiales y Métodos

El trabajo se realizó en “Isla Cerritos” (88° 15’ 52’’O; 21° 34’ 02’’N), localizada a 5,510 m al Este del Puerto de San Felipe, Yucatán, México. Su extensión es de 10.8 km de largo por 2.8 km de ancho (2,362.4 has), el municipio de San Felipe, está localizado en la región oriente de la franja costera del estado de Yucatán en el sureste de la república mexicana. Se ubica en las coordenadas geográficas (Aguilar-Cordero *et al.* 2012) (Fig.1). Debido a la extensión de la plataforma de la península de Yucatán, en esta zona se presenta una pendiente muy ligera, por lo cual no posee una gran profundidad, presenta fondos arenosos, con partes que poseen substrato con limo o arcilla, seguido de rocas calcáreas (Robledo 1996).

La Península de Yucatán presenta un clima cálido semiárido con lluvias en verano (García y Mosiño, 1992). El régimen de lluvias marca el patrón climático, reconociéndose tres épocas: secas (marzo-mayo), lluvias (junio-octubre) y nortes (noviembre-febrero) y la temporada de huracanes que va de agosto a septiembre (Herrera-Silveira, 1998).

Se seleccionaron dos sitios de muestreo: Cerritos 1 (21°34’302” N y 088°17’570” O), esta zona está compuesta por pasto marino (*Thalassia testudinum*) y algas calcáreas verdes y tienen una profundidad media de 60 cm y fondo limoso-arenoso. Cerritos 2 (21°33’752” N y 088°18’301” O) es una zona donde predomina *Avranvillea rawsonii* y *A. longicaulis* y por algas verdes calcáreas como *Halimeda*,

Penicillus, *Udotea* y *Rhipocephalus*, la profundidad media es de 150 cm con fondo arenoso y limoso (Fig. 1).

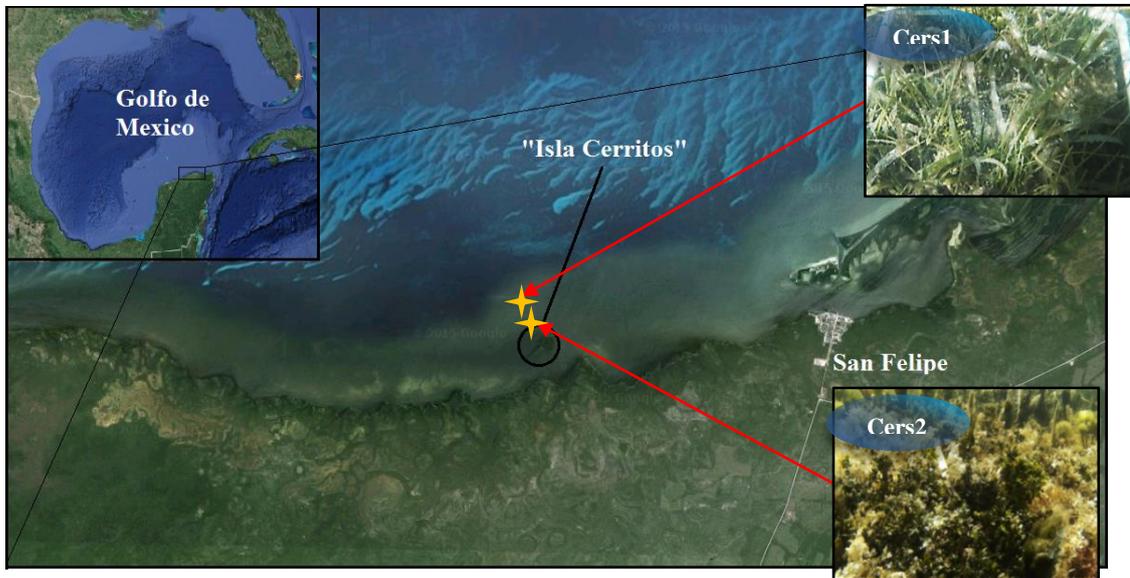


Figura 1. Ubicación de los sitios de muestreo en “Isla Cerritos”-San Felipe, sitios de muestreo en Yucatán, México: Cerritos 1 (Cers 1) y Cerritos 2 (Cers 2).

Las técnicas de muestreo que a continuación se describen se realizaron de acuerdo a las técnicas por el laboratorio de Macroalgas Marinas de la FIU para el monitoreo de la producción de Corg y CaCO_3 de algas calcáreas, como a continuación se describe:

Se realizaron cuatro muestreos trimestralmente desde junio del 2014 hasta marzo del 2015. Para cada muestreo, la biomasa de *Halimeda* y *Penicillus* se recolectó por medio de seis cuadrantes de 0.50 m^2 ubicados aleatoriamente. Una vez recolectadas las muestras se colocaron en bolsas plásticas para su traslado y procesamiento en el laboratorio del Departamento de Biología Marina de la Universidad Autónoma de Yucatán. Las muestras se separaron y se determinaron taxonómicamente, se lavaron y se limpiaron para eliminar la materia orgánica y los epibiontes. Posteriormente, las muestras ya separada por especie fueron secadas en un horno Felisa a una temperatura entre los $70\text{-}80^\circ\text{C}$ hasta lograr un peso constante, para obtener el peso seco total de las muestra (biomasa total o Tot-C). Posterior al pesado, las muestras se incineraron a 500°C por cuatro horas para obtener la proporción de Corg y CaCO_3 , la cual se obtuvo de restarle el peso de las cenizas (CaCO_3) a la biomasa total, las

cuales se determinaron por especie y se expresaron en unidades de peso por área (g/m^2):

$\text{Corg} = \text{Biomasa total} - \text{cenizas}$

$\text{CaCO}_3 = \text{Biomasa total} - \text{Corg}$

Para detectar si hay variación entre la biomasa, la proporción de CaCO_3 y Corg entre los dos sitios, los cuatro muestreos y las tres especies (2-4-3), se utilizó una ANOVA no paramétrica Kruskal-Wallis debido a que los datos no cumplieron con los supuestos de normalidad de distribución y homogeneidad de variancia, bajo un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$. Los análisis estadísticos se llevaron a cabo usando el programa SPSS Statistics versión 20.

Resultados

La biomasa estuvo compuesta por tres especies de algas verdes calcáreas: *Halimeda incrassata*, *Halimeda opuntia* y *Penicillus dumetosus*. El promedio anual de biomasa de las algas verdes fue $1,087.2 \text{ g}/\text{m}^2$, de la cual un 88% fue CaCO_3 y el 12% Corg. En general, la proporción de CaCO_3 para ambos sitios varió entre el 85% y el 90% de la biomasa total, con excepción de marzo donde la proporción de CaCO_3 fue entre el 90% y 95% de la biomasa. Se detectaron diferencias significativas en la biomasa y su proporción de CaCO_3 y Corg entre los meses a lo largo del año ($h = 13.100$, $P = .004$) (Fig.2).

Para cada sitio, se detectó una tendencia variable en la biomasa, pudiéndose observar en “Cerritos 1” la biomasa es mayor en junio y va disminuyendo en septiembre y diciembre, para luego aumentar en marzo. A diferencia de lo observado, en “Cerritos 2” va aumentando la biomasa de junio a septiembre, para luego ir disminuyendo en diciembre y marzo. El sitio que presentó la mayor biomasa en todo el año fue “Cerritos 2” ($1,338.2 \text{ g}/\text{m}^2$) con una proporción del 87% de CaCO_3 y el 13% Corg. En este sitio se detectó la mayor biomasa ($1,861.3 \text{ g}/\text{m}^2$) en septiembre del cual el 86% fue CaCO_3 . En marzo hubo menor biomasa ($774 \text{ g}/\text{m}^2$) del cual el 93% fue CaCO_3 . En “Cerritos 1” el promedio anual de biomasa fue de $836.1 \text{ g}/\text{m}^2$ con una proporción del 90% de CaCO_3 y 10% de Corg, donde junio tuvo mayor biomasa

(1,591.8 g/m²) del cual el 89% fue CaCO₃ y en diciembre se detectó la menor biomasa (287.8 g/m²), entre los dos sitios de muestreo se encontró que existen diferencias significativas en su biomasa ($h= 4.951$, $P=.026$) y su proporción de CaCO₃ y Corg (Fig. 3).

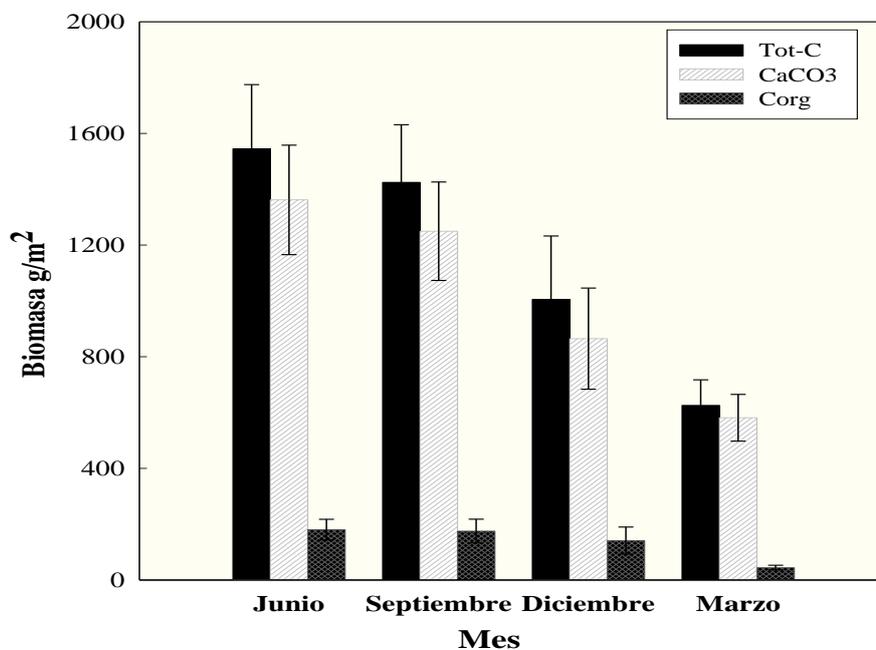


Figura 2. Biomasa total y error estándar de las algas verdes calcáreas y su proporción de CaCO₃ y Corg por mes de muestreo en "Isla Cerritos" San Felipe, Yucatán, México.

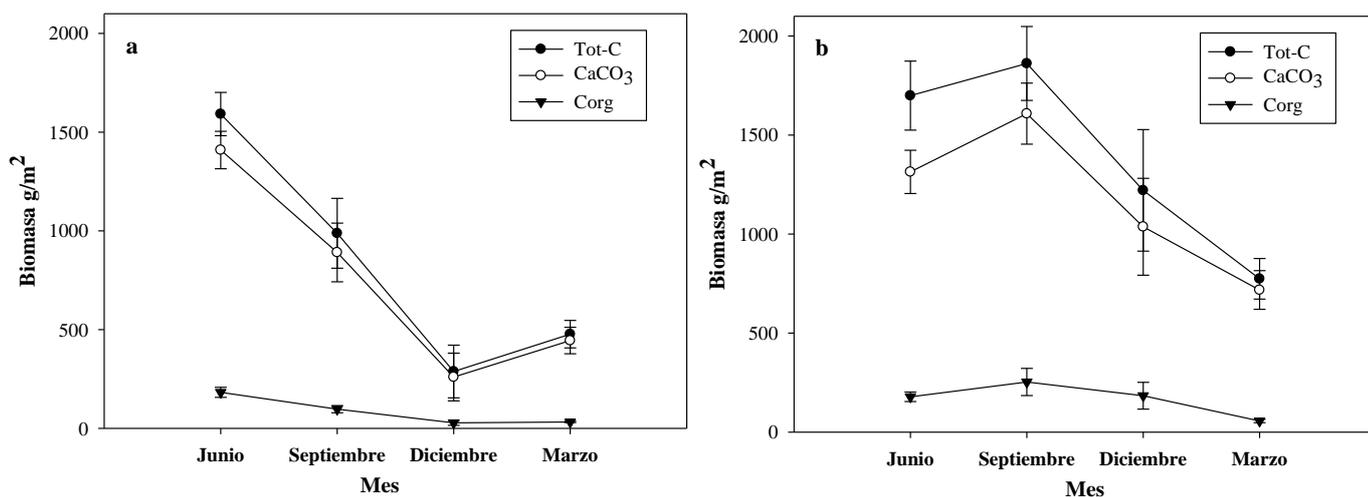


Figura 3. Biomasa total por mes, error estándar y su proporción en CaCO₃ y Corg, en los sitios de Cerritos 1 (a) y Cerritos 2 (b), San Felipe, Yucatán, México.

La composición de las especies de cada uno de los sitios presentó variación con respecto a las diferentes épocas del año, encontrándose a *Halimeda opuntia* todo el año en “Cerritos 1” mientras que *Halimeda incrassata* sólo en septiembre, diciembre y marzo, y *Penicillus dumetosus* sólo en marzo. En “Cerritos 2” las tres especies se presentaron durante todo el año aunque en diferentes proporciones. *Halimeda opuntia* tuvo la mayor biomasa durante todo el estudio con una media de 1,032.9 g/m² de la cual el 89% era CaCO₃ (919.5 g/m²) y un 11% Corg (113.1 g/m²). *Penicillus dumetosus* tuvo una biomasa anual de 37.9 g/m² y *Halimeda incrassata* con 16.3 g/m² de biomasa (Fig. 4).

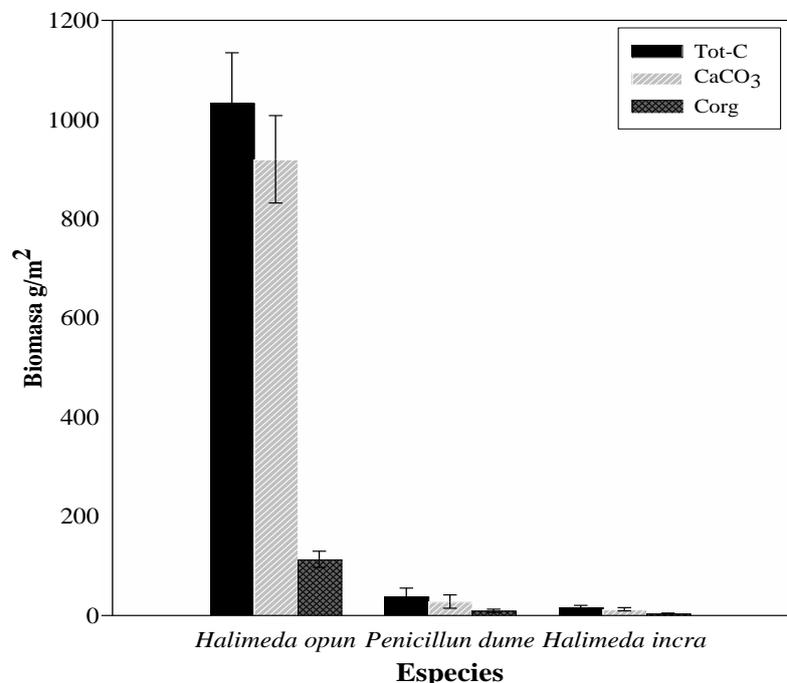


Figura 4. Biomasa total y su error estándar de las algas calcáreas verdes *Halimeda opuntia*, *Penicillus dumetosus* y *Halimeda incrassata*, en “Isla Cerritos” san Felipe, Yucatán, México.

Se encontró que la biomasa y su proporción de CaCO₃ y Corg de *Halimeda opuntia* fue diferente entre los meses de muestreo ($h= 12.231$, $P=.007$), sin embargo entre los dos sitios de muestre no se encontró diferencia significativa en la biomasa y su proporción de CaCO₃ y Corg ($h= 3.402$, $P=.065$). *Halimeda opuntia* presentó la mayor biomasa (1,750 g/m²) de “Cerritos 2” en septiembre del cual el 87% era CaCO₃ (1,528 g/m²) y luego disminuyó en diciembre y marzo (Fig. 5a). En “Cerritos 1” *Halimeda opuntia* registró su mayor biomasa en Junio (1,591 g/m²) del cual el

89% es CaCO₃ (1,409 g/m²), disminuyendo en septiembre y diciembre, siendo este último mes y sitio la biomasa más baja (281.4 g/m²) registrada para *Halimeda opuntia* en todo el año, incrementándose en marzo nuevamente (Fig. 5b).

La biomasa y su proporción de CaCO₃ y Corg de *Penicillus dumetosus* no varió entre los meses de muestreo (h= 3.601, P=.308), sin embargo entre los dos sitios de muestre se encontró diferencia significativa en la biomasa y su proporción de CaCO₃ y Corg (h= 11.988, P=.001). Para “Cerritos 1” *P. dumetosus* se encontró una vez en todo el año en marzo con una biomasa de 2.6 g/m² del cual 67% fue CaCO₃ (1.8 g/m²), siendo esta la masa baja registrada para la zona (Fig. 6a). *Penicillus dumetosus* presentó su mayor biomasa en “Cerritos 2” en Junio (173.5 g/m²) del cual el 81% es CaCO₃ (136.7 g/m²) y la menor en diciembre 50.9 g/m² del cual el 62% fue CaCO₃ (31.6 g/m²), en marzo no se detectó (Fig. 6b).

La biomasa y su proporción de CaCO₃ y Corg de *Halimeda incrassata* no varió entre los meses de muestreo (h= 1.449, P=.694), ni entre los dos sitios (h= 1.250, P=.264). *Halimeda incrassata* presentó su mayor biomasa en “Cerritos 1” en marzo (34.783 g/m²) del cual el 86% fue CaCO₃ (29.906 g/m²) y la menor en diciembre, estando ausente en junio (Fig. 7a). En contraste, en “Cerritos 2” *H. incrasata* en septiembre presentó la mayor biomasa de 34.388 g/m² siendo el 78% CaCO₃ disminuyendo en diciembre, estando ausente en marzo (Fig. 7b).

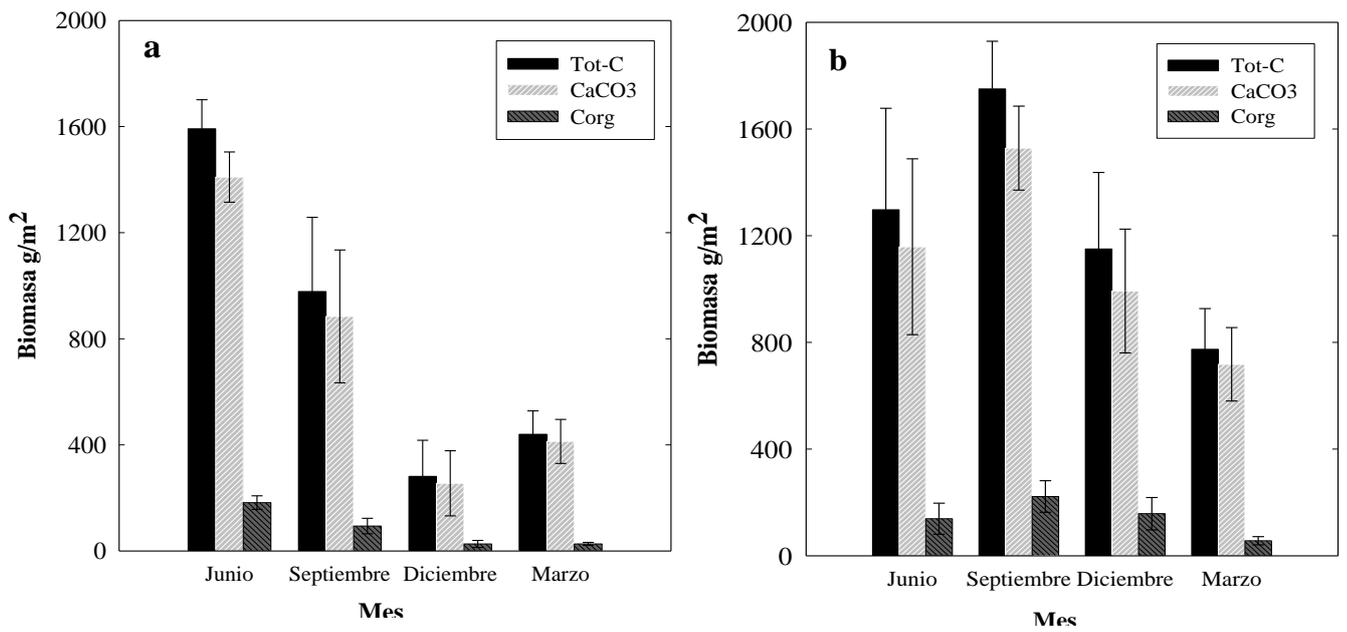


Figura 5. Biomasa y error estándar de *Halimeda opuntia* por mes y por sitio, a) biomas y su proporción de CaCO₃ y Corg en Cerritos 1, b) biomasa y su proporción de CaCO₃ y Corg en Cerritos 2, San Felipe, Yucatán, México.

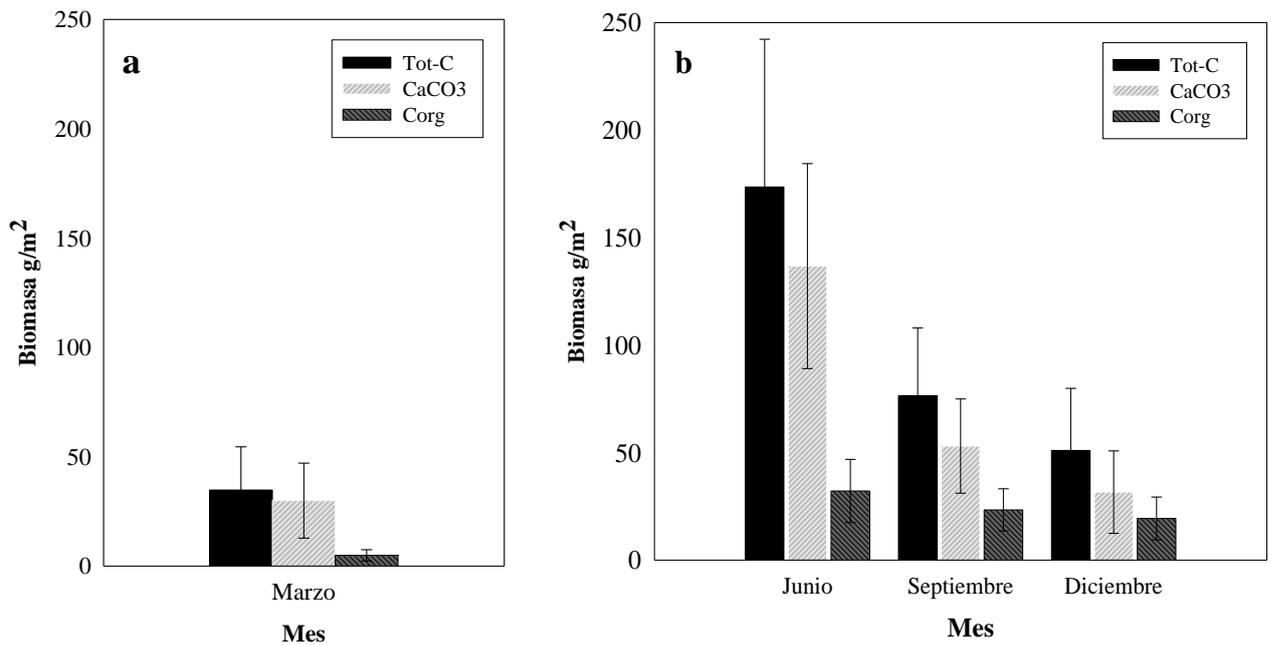


Figura 6. Biomasa y error estándar de *Penicillus dumetosus* por mes y por sitio, a) biomasa y su proporción de CaCO₃ y Corg en Cerritos 1, b) biomasa y su proporción de CaCO₃ y Corg en Cerritos 2, San Felipe, Yucatán, México.

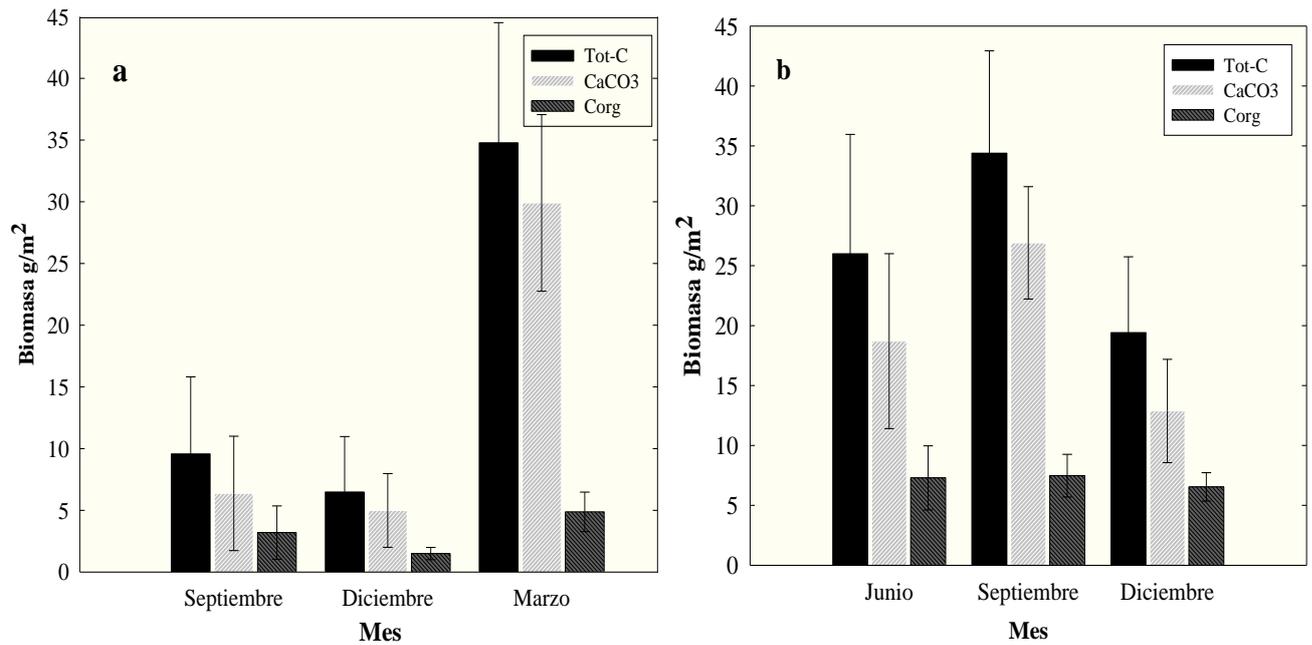


Figura 7. Biomasa y error estándar de *Halimeda incrassata* por mes y por sitio, a) biomas y su proporción de CaCO₃ y Corg en Cerritos 1, b) biomas y su proporción de CaCO₃ y Corg en Cerritos 2, San Felipe, Yucatán, México.

Discusión

De la biomasa anual, la contribución de CaCO₃ de *Halimeda* y *Penicillus* fue de 960.2 g/m². Esta cantidad es similar a la registrada (815 g/m² de CaCO₃) por van Tussenbroek y van Dijk (2007) para macroalgas en Puerto Morelos, Quintana Roo e inferior a la registrada (2323 g/m² de CaCO₃) en Panamá por Freile y Hillis (1997). Estas diferencias pudieran deberse al esfuerzo de muestreo que se realizó en cada sitio ya que los datos utilizados en Puerto Morelos son el resultados de seis años de muestreo a diferencia de este trabajo que presenta los datos de un año, otro factor son las especies involucradas, ya que la tasa de calcificación y crecimiento varía según especie (Stark *et al.* 1969). En “Isla Cerritos” la biomasa estaba compuesta en su mayoría por *Halimeda opuntia* cuya forma de crecimiento es clonal con varios discos de fijación o anclaje y presentándose en la zona en grandes parches (camas).

La diferencia encontrada en biomasa y cantidad de CaCO₃ entre los dos sitios de muestreo en Isla Cerritos se puede deber a la composición de especies de algas calcáreas de cada sitio la cual puede estar dada por la estructura y composición de las

comunidades de pastos marinos, la profundidad y el sustrato. En “Cerritos 1”, estuvo dominada por praderas de pastos marinos que pueden competir con *Halimeda* por espacio y nutrientes. Los pastos marinos pueden limitar la luz disponible para la fotosíntesis de *Halimeda* (Davis y Fourqurean 2001), la profundidad en esta zona fue muy variada (70 cm en épocas de lluvia a 30 cm en secas) exponiendo por completo las algas. En contraste, “Cerritos 2” tuvo en promedio 120 cm de profundidad con las algas permaneciendo sumergidas incluso durante las más bajas mareas y los meses más calurosos. También esta zona presentó una menor densidad de pastos marinos por lo cual una menor competencia para las algas calcáreas verdes, presentando la mayor biomasa en todo el año con 1,338.2 g/m² con una proporción del 87% de CaCO₃.

Se detectó una variación temporal con respecto a la biomasa y CaCO₃, encontrándose la mayor biomasa en junio y septiembre, meses que se caracterizan por un incremento en la intensidad de luz y lluvias. Esto coincide con lo encontrado por Borowitzka y Larkum (1976) quienes reportan que la producción de CaCO₃ de algas calcáreas verdes se ve influenciada por la estacionalidad, encontrando una mayor producción de CaCO₃ durante el verano y bajas durante el invierno, ya que la tasa de calcificación es directamente proporcional a la fotosíntesis, incrementando su tasa de calcificación en los meses con mayor exposición de luz. En marzo se presentó la mayor proporción de CaCO₃ en todo el año. Esto puede ser debido al cambio en la estación de nortes a secas, la cual se caracteriza por la disminución del oleaje, el aumento en la temperatura del agua y la iluminación (Herrera-Silveira 1998). Hubo diferencias significativas entre la biomasa y la proporción de CaCO₃ por meses, mostrando la variación y diferencia entre las temporadas climáticas. Estas consideraciones indican que la calcificación es más que un subproducto fortuito de la fotosíntesis; mostrando que existe una relación entre los dos procesos (Stark *et al.* 1969, Borowitzka y Larkum 1976, Littler *et al.* 1983).

La biomasa y proporción de CaCO₃ fue diferente entre las especies, siendo *Halimeda opuntia* la de mayor biomasa y con un área de superficie mayor por unidad volumen que las demás algas calcáreas en la zona. *Halimeda opuntia* ha demostrado que

incorpora casi el doble de calcio por gramo de peso seco por unidad de tiempo que otras algas como *Halimeda discoidea* (Stark *et al.* 1969).

Debido a la importante contribución de material carbonatado (956.736 g/m²/año) en “Isla Cerritos”, se recomienda realizar trabajos alternos que involucren el monitoreo de las praderas de pastos marinos, la fotosíntesis de las algas calcáreas y si la profundidad juega un papel importante en ambos sitios de muestreo. Ya que al conocer esta información permitirá detectar cambios en el medio a través del monitoreo de su biomasa y poder establecer un correcto uso y manejo del área.

Referencias

Aguilar Cordero, W.D.J., C. Castillo., N. Neredva., C. Cab., y J. Griselda. 2012. El manejo del área marina y costera protegida Actam Chuleb y los beneficios económicos que genera a los usuarios del municipio de San Felipe, Yucatán, México. *Estud. Soc.* 20(40): 127-153.

Andersson, A.J., F.T. Mackenzie y A. Lerman. 2005. Coastal ocean and carbonate systems in the high CO₂ world of the Anthropocene. *Am. J. Sci.* 305(9): 875-918.

Athié G., J. Candela, J. Sheinbaum, A. Badan y J. Ocho. 2011. Estructura de la corriente de Yucatán en los canales de Cozumel y Yucatán. *Cienc Mar.* 37(4A): 471-492.

Barry, S.C., T.K. Frazer y C.A. Jacoby. 2013. Production and carbonate dynamics of *Halimeda incrassata* (Ellis) Lamouroux altered by *Thalassia testudinum* Banks and Soland ex König: *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 444: 73-80.

Borowitzka M.A. y A.W.D. Larkum. 1976. Calcification in the green algae *Halimeda*. I. An ultrastructure study of thallus development. *J. Phycol.* 13: 6-16.

Bouillon, S., A.V. Borges, E. Castañeda-Moya, K. Diele, T. Dittmar, N.C. Duke, E. Kristensen, S.Y. Lee, C. Marchand, J.J. Middelburg, V.H. Rivera-Monroy, T.J. Smith III y R.R. Twilley. 2008. Mangrove production and carbon sinks: a revision of global budget estimates. *Global Biogeochem. Cy.* 22(2).

Chmura, G.L., S.C. Anisfeld, D.R. Cahoon y J.C. Lynch. 2003. Global carbon sequestration in tidal, saline wetland soils. *Global Biogeochem. Cy.* 17(4).

Collado-Vides, L., Caccia, V.G., Boyer, J.N., y Fourqurean, J.W. 2007. Tropical seagrass-associated macroalgae distributions and trends relative to water quality. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 73(3): 680-694.

Collado-Vides, L., L.M. Rutten y J.W. Fourqurean. 2005. Spatiotemporal variation of the abundance of calcareous green macroalgae in the Florida Keys: a study of synchrony within a macroalgal functional-form group. *J. Phycol.* 41: 742-752.

- Davies, P.J. y J.F. Marshall. 1985. *Halimeda* bioherms—low energy reefs, northern Great Barrier Reef. Proceedings of the Fifth International Coral Reef Congress 1: 1-7.
- Davis, B.C. y J.W. Fourqurean. 2001. Competition between the tropical alga, *Halimeda incrassata*, and the seagrass, *Thalassia testudinum*. Aquat. Bot. 71(3): 217-232.
- Díaz-Pulido, G., McCook, L.J., Larkum, A.WD., Lotze, H.K., Raven, J.A., Schaffelke, B., Smith, J.E. y Steneck, R.S. 2007. Vulnerability of macroalgae of the Great Barrier Reef to climate change. In Climate Change and the Great Barrier Reef. J.E. Johnson & P.A. Marshall, Eds.: 154-192.
- Dupont, S., J. Havenhand, W. Thorndyke, L. Peck y M. Thorndyke. 2008. Near-future level of CO₂-driven ocean acidification radically affects larval survival and development in the brittlestar *Ophiothrix fragilis*. Mar. Ecol. Prog. Ser. 373: 285-294.
- Fourqurean, J.W., C.M. Duarte, H. Kennedy, N. Marbà, M. Holmer, M.A. Mateo, G. A. Kendrick, D. Krause-Jensen, K.J. McGlathery y O. Serrano. 2012. Seagrass ecosystems as a globally significant carbon stock. Nat Geosci. 5(7): 505-509.
- Freile, D. y L. Hillis. 1997. Carbonate productivity by *Halimeda incrassata* in a land proximal lagoon, Pico Feo, San Blas, Panama. In Proc. 8th Int. Coral Reef Symp.1: 767-772.
- García U.G. 2011. Dinámica de los parámetros físico-químicos en agua y sedimento de la zona costera de puerto Progreso, Yucatán. Maestra en Ciencias. Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología. UNAM.
- García, E. y P. Mosiño. 1992. Los climas de México. Instituto de Geografía de la UNAM. México, D.F. 27.
- Herrera-Silveira, J.A., J. Ramírez-Ramírez, y A. Zaldivar-Jiménez. 1998. Overview and characterization of the hydrology and primary producer community of selected

coastal lagoons of Yucatán, México. Aquatic Ecosystem Health and Management Society. 1: 353-372.

Hillis, L. 1997. Coral reefs from a calcareous green alga perspective, and a first carbonate budget. Proc. 8th Int. Coral Reef Symp. 1: 761-766.

Hillis-Colinvaux, L. 1980. Ecology and taxonomy of *Halimeda*: primary producers of coral reefs. Adv. Mar. Biol. 17: 1-327.

Kleypas J.A., R.A. Feely, V.J. Fabry, C. Langdon, C.L. Sabine y L.L. Robbins. 2006. Impacts of ocean acidification on coral reefs and other marine calcifiers: a guide for future research. 88 pp. Report of a workshop sponsored by NSF, NOAA, and the U.S. Geological Survey. St. Petersburg, Florida.

Littler, M.M., D.S. Littler, S.M. Blair y J.N. Norris. 1986. Deepwater plant communities from an uncharted seamount off San Salvador Island, Bahamas: distribution, abundance, and primary productivity. Deep Sea Res. 33: 881-892.

Robledo, D. 1996. Conocimiento de la macroflora marina de interés económico de las costas de Yucatán. Informe final* del Proyecto B077. Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigaciones y de Estudios Avanzados-Mérida, dep. De Recursos del Mar, Laboratorio de ficología Mérida, Yucatán, México.

Stark, L.M., L. Almodovar y R.W. Krauss. 1969. Factors affecting the rate of calcification in *Halimeda opuntia* (L.) Lamouroux and *Halimeda discoidea* Decaisne. J. Phycol. 5: 305-312.

van Tussenbroek, B.I. y J.K. van Dijk. 2007. Spatial and temporal variability in biomass and production of Psammophytic *Halimeda incrassata* (bryopsidales, chlorophyta) in a Caribbean reef lagoon. J. Phycol. 43: 69-77.

Crecimiento y Producción de Carbono Orgánico y CaCO₃ de las Algas Calcáreas Verdes *Halimeda* Y *Penicillus* (Bryopsidales, Chlorophyta) en dos sitios en San Felipe, Yucatán, México

Chuc-Contreras Andrea¹, Ortegón-Aznar Ileana¹ y Collado-Vides Ligia².

¹. Departamento de Recursos Marinos, CCBA. Universidad Autónoma de Yucatán. C.P. 97100. Mérida Yucatán México. chuccontreras@gmail.com; ². Department of Biological Sciences, and Southeast Environmental Research Center, Florida International University, Miami, FL 33199, USA.

Resumen

Los organismos calcificadores como las algas calcáreas (*Halimeda* y *Penicillus*) son productores importantes de sedimentos marinos y contribuyen al secuestro y deposición de carbono orgánico (Corg), y carbono inorgánico (CaCO₃). El objetivo de éste trabajo es evaluar la producción y tasa de crecimiento de tres especies de algas verdes calcáreas en San Felipe, Yucatán. Los muestreos se realizaron trimestralmente en dos sitios. Para medir la producción se utilizó la biomasa del alga (g/m²) y la tasa de crecimiento (g/día); esta última se midió por la técnica de rojo de alizarina. La tasa de crecimiento total de la zona fue 77.307 g/año con 52% (40.478 g/año) de CaCO₃. La producción fue 1084.269 g/m²/año con 85% (896.920 g/m²/año) de CaCO₃. El alga con mayor tasa de crecimiento y producción fue *Halimeda opuntia* 0.154 g/día y 737.80 g/m²/año, respectivamente. Hubo diferencias significativas en la tasa de crecimiento y la producción entre los dos sitios de muestreo y entre los meses. Estos resultados muestran que San Felipe es una zona importante de producción de sedimentos carbonatados y de alta productividad. Éste estudio muestra que *Halimeda opuntia* representa más del 60% de la producción total. Se recomienda establecer un monitoreo a largo plazo para detectar sus fluctuaciones naturales a lo largo del tiempo y las posibles interacciones. Es primordial expandir el área de muestreo para conocer zonas claves de producción y sedimentación de carbono en la zona costera de Yucatán.

Palabras clave: Algas calcáreas, crecimiento, producción, CaCO₃, *Halimeda opuntia*.

Nota: El texto fue elaborado de acuerdo con las normas editoriales de la revista BOTANICA MARINA.

Introducción

Los cambios climáticos y la acidificación del océano son las amenazas principales que enfrentan hoy en día los organismos calcificadores como las algas calcáreas verdes (Koch *et al.* 2013). La costa norte de la Península de Yucatán ha sufrido grandes cambios en los últimos años de los cuales no hay información sobre su impacto en los organismos calcificadores. En general, las estimaciones disponibles indican que las tasas de calcificación en organismos marinos han disminuido de 11 a 44% desde la época preindustrial (Andersson *et al.* 2005) y se reducirá a 60 % durante el siglo XXI (Kleypas *et al.* 2006, Dupont *et al.* 2008).

Los organismos calcificadores como las algas calcáreas (*Halimeda* y *Penicillus*) se caracterizan por incorporar carbonato de calcio (CaCO_3) en su tejido por precipitación. Esto lo pueden lograr a través de la fotosíntesis, debido al consumo de CO_2 para la producción de carbohidratos, como consecuencia las algas calcáreas verdes son productores importantes de sedimentos marinos y contribuyen al secuestro y deposición de carbono (Hillis-Colinvaux 1980, Davies y Marshall 1985, Díaz-Pulido *et al.* 2007). Son altamente vulnerables a los cambios en el ambiente, ya que un cambio en él, impacta directamente a su producción primaria y tasa de calcificación y son sensibles a los efectos que traería la acidificación del océano (Collado-Vides *et al.* 2005, Díaz-Pulido *et al.* 2007, Barry *et al.* 2013, Koch *et al.* 2013).

El tipo de crecimiento de *Halimeda* se da a través de sus numerosos segmentos calcificados, unidos por nodos no calcificados (genícula) (Hillis-Colinvaux 1980). Estos segmentos se pueden agregar secuencialmente creciendo y calcificando en su totalidad dentro de 36 horas, los segmentos más viejos se suelen desprender como parte del ciclo de crecimiento y senescencia (Hillis-Colinvaux 1972, Hillis 1997).

El alga *Halimeda* puede contribuir en un 8% a la producción de carbonato total mundial (Hillis 1997) ya que más del 80% de su biomasa total corresponde a CaCO_3 (Collado-Vides *et al.* 2005, 2007). Sin embargo la producción de CaCO_3 puede variar dependiendo de las diferentes regiones, (Drew 1983, Freile y Hillis 1997, van

Tussenbroek y van Dijk 2007), y por época del año (Borowitzka y Larkum 1976 Freile y Hillis 1997, Collado-Vides *et al.* 2005, van Tussenbroek y van Dijk 2007). Así mismo las tasas de crecimiento de *Halimeda* y *Penicillus* también pueden variar dependiendo de la especie (Wefer 1980), los factores ambientales y épocas del año (Wefer 1980, Beach *et al.* 2003).

En el Sureste del Golfo de México, no existen registros de trabajos donde se estime la productividad de algas calcáreas verdes como *Halimeda* y *Penicillus*, por lo que el objetivo de este estudio es determinar su tasa de crecimiento y estimar la producción de carbono y su proporción en orgánico (Corg) y el CaCO₃, en algas del género *Halimeda* y *Penicillus*.

Materiales y Métodos

El trabajo se realizó en la zona de “Isla Cerritos” (88° 15’ 52’’O; 21° 34’ 02’’N), localizada a 5,510 m al Este del Puerto de San Felipe, Yucatán. Su extensión es de 10.8 km de largo por 2.8 km de ancho (2,362.4 has), el municipio de San Felipe, está localizado en la región oriente de la franja costera del estado de Yucatán en el sureste de la república mexicana. Se ubica en las coordenadas geográficas (Aguilar Cordero *et al.* 2012) (Fig.1). Debido a la extensión de la plataforma de la península de Yucatán, en esta zona se presenta una pendiente muy ligera, por lo cual no posee una gran profundidad, presenta fondos arenosos, con partes que poseen substrato con limo o arcilla, seguido de rocas calcáreas (Robledo 1996).

Se seleccionaron dos sitios de muestreo: Cerritos 1 (21°34’302’’ N y 088°17’570’’ O), esta zona está compuesta por pasto marino (*Thalassia testudinum*) y algas calcáreas verdes y tienen una profundidad media de 60 cm y fondo limoso-arenoso. Cerritos 2 (21°33’752’’ N y 088°18’301’’ O) que es una zona donde predomina *Avranvillea rawsonii* y *A. longicaulis* y por algas verdes calcáreas como *Halimeda*, *Penicillus*, *Udotea* y *Rhipocephalus*, la profundidad media es de 150 cm con fondo arenoso y limoso (Fig. 1).

Se realizaron cuatro muestreos desde junio del 2014 hasta marzo del 2015 trimestralmente. Para estimar la tasa de crecimiento de tres especies de algas

calcáreas verdes, *Halimeda incrassata*, *Halimeda opuntia* y *Penicillus dumetosus*, en cada estación de colecta, se seleccionaron 20 talos de *Halimeda incrassata*, 20 de *Halimeda monile* y 20 de *Penicillus dumetosus*, obteniendo una total de 60 talos por muestreo y 240 en total (cuatro muestreos).

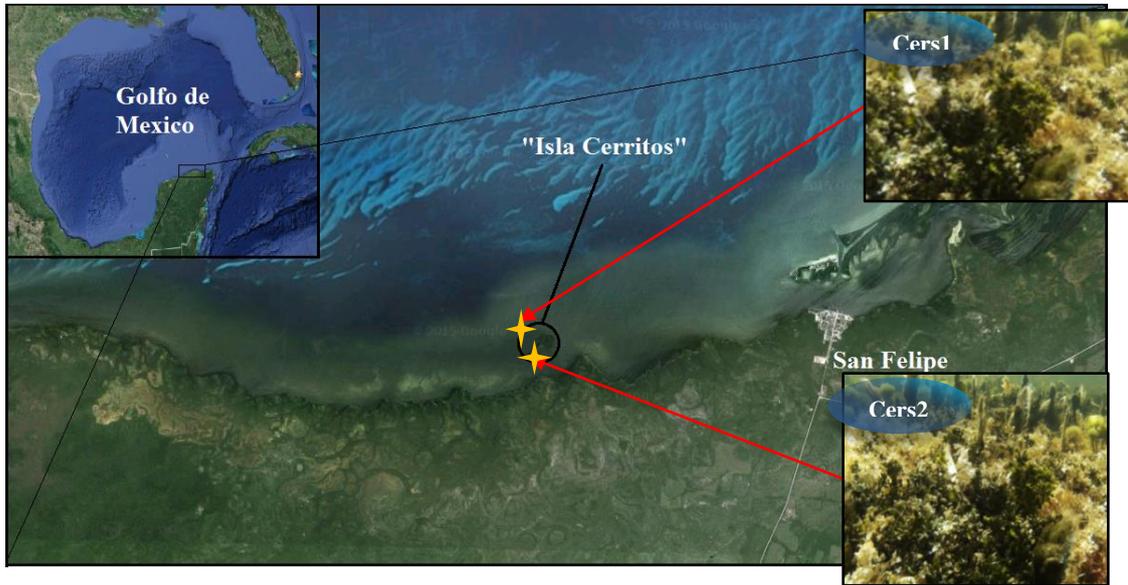


Figura 1. Vista satelital de los puntos de muestreo en "Isla Cerritos", San Felipe, Yucatán, México: Cerritos 1 (Cers 1) y Cerritos 2 (Cers 2).

Se utilizó el método de Tinte alizarina-S para distinguir el nuevo crecimiento del tejido existente. Los talos se tiñeron con Tinte alizarina-S para que el nuevo tejido, sin mancha, fuese distinguible al final de un período de crecimiento in situ (Wefer 1980, Multer 1988, Davis y Fourqurean 2001, Vroom *et al.* 2003, van Tussenbroek y van Dijk 2007). Esta tinción se realizó por medio de la colocación de bolsas transparentes con capsulas del tinte alizarina-S sobre cada uno de los talos de las algas (Fig. 2^a), para que éste entre en contacto con el alga y por medio de la fotosíntesis incorpore el tinte a sus células. Este proceso dura dos días (Fig.2^b), después del cual las bolsas junto con las capsulas de tinte son retiradas y se dejan las algas marcadas con cintas durante siete días para que realicen su proceso normal de crecimiento.

Después de siete días, se recogieron las macrófitas marcadas, que fueron congeladas, y etiquetadas para su traslado al laboratorio del Departamento de Biología Marina de

la Universidad Autónoma de Yucatán donde fueron procesadas. Este procedimiento se repitió a lo largo de los cuatro muestreos.

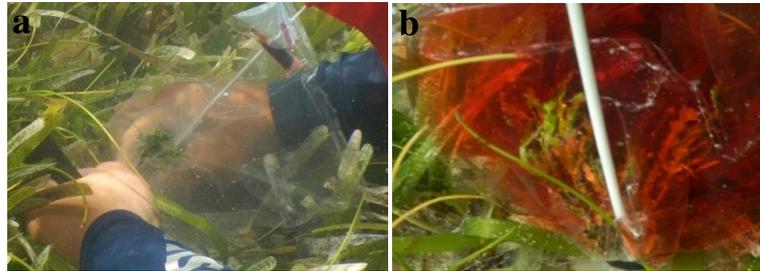


Figura 2. a) Fijación del alga al sustrato y a la bolsa con la tinción de alizarina-S, b) liberación de la alizarina-S en la bolsa para el proceso de tinción.

En el laboratorio, cada talo se enjuagó con agua dulce para eliminar la arena, escombros y epífitas. Los nuevo segmentos sin teñir y viejos segmentos teñidos fueron separados (Fig. 3) y colocados en diferentes viales de vidrio de borosilicato tarados, las muestras fueron secadas en un horno Felisa a una temperatura entre los 70-80°C hasta lograr un peso constante, posteriormente se registraron los pesos secos, posterior al pesado. Las muestras fueron trasladadas a platos de aluminio para ser incineradas a 500 °C por 4 horas. Estas muestras se dejaron enfriar antes de ser pesadas para determinar cantidades de carbono inorgánico, es decir, CaCO_3 por especie de los segmentos viejos y nuevos (Davis y Fourqurean 2001). La calcinación a 500 °C representa un método fiable para determinar el contenido de CaCO_3 de sedimentos (Hirota y Szyper 1975, Byers *et al.* 1978, Barry *et al.* 2013). Para los propósitos de este estudio, las contribuciones a partir de silicio y otros elementos en las muestras se considera insignificante (Barry *et al.* 2013).

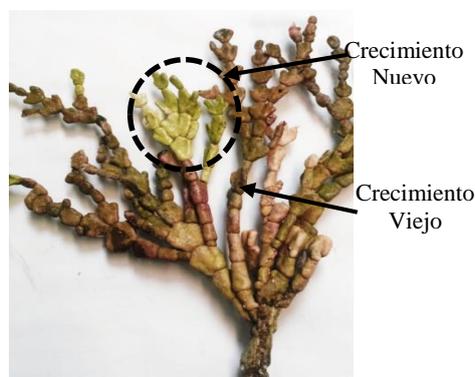


Figura 3. Nuevos segmentos de *Halimeda incrassata* al día 10 del experimento.

Se registró como biomasa total al peso seco de todos los talos medidos por especie, el peso seco del nuevo material fue tomado como medida directa del crecimiento total el cual fue dividido entre los días de crecimiento para obtener la tasa de crecimiento por día (g/día). El contenido orgánico del crecimiento se estimó restando la fracción inorgánica obtenida de la calcinación al peso seco de una muestra (Davis y Fourqurean 2001, van Tussenbroek y van Dijk 2007).

La producción diaria por especie se obtuvo de dividir la tasa de crecimiento del peso total por la biomasa estos datos se calcularon por especie, por sitio y por mes con estos datos se obtendrá la producción en gramos por día por unidad de área (g/día/m²), utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{Producción} = \left(\frac{\text{tasa de crecimiento}}{\text{peso total del alga}} \right) * \text{biomasa total}$$

Esta misma fórmula se aplicó con los datos de CaCO₃ y Corg para conocer su producción por especie, por sitio y por mes en gramos por día por unidad de área (g/día/m²) (van Tussenbroek y van Dijk 2007).

Las estimaciones se calcularon por separado para todos talos y la porción de cada talo que representa un nuevo crecimiento. Además, el contenido de CaCO₃ en los nuevos crecimientos proporcionó una medida general de la calcificación. El diseño de experimental utilizado para el análisis de los datos fue 3-2-4, tres especies, dos sitios y cuatro meses. Para analizar las tasas de crecimiento anual, por sitios y por mes se usó el análisis de ANOVA no paramétrica de Kruskal-Wallis debido a que los datos no cumplieron con los supuestos de normalidad de distribución y homogeneidad de variancia. Los datos producción cumplieron con los supuestos antes mencionados de normalidad y homogeneidad por lo cual se aplicó una análisis multifactorial de tres vías, para conocer si existe una diferencia en la producción de carbono y el contenido de CaCO₃, por sitio, por mes y por especie. Los análisis estadísticos se llevaron a cabo con el programa SPSS Statistics versión 20.

Resultados

Tasa de crecimiento

Del total de 480 talos de *Halimeda opuntia*, *Halimeda incrassata* y *Penicillus dumetosus* que se estudiaron en los dos sitios de “Isla Cerritos” a lo largo de un año, solo 58.5% (280 talos) fueron recuperados después de un periodo de crecimiento de 7 días. La tasa de crecimiento al día fue 0.211 g/día, y al año 77.307 g/año de los cuales la proporción de CaCO₃ fue de 0.110 g/día y 40.478 g/año.

El alga con mayor tasa de crecimiento por día fue *Halimeda opuntia* con 0.154 g/día, del cual el 54% (0.067g/día) fue CaCO₃, el alga con menor tasa de crecimiento al año fue *Penicillus dumetosus* con 0.015 g/día, del cual el 60% (0.009 g/día) fue CaCO₃. El alga con mayor proporción de CaCO₃ en su crecimiento en todo el año fue *Halimeda incrassata*, siendo un 80% del peso de su crecimiento por día CaCO₃, mostrando que existe un diferencia significativa en la tasa de crecimiento por día entre especies ($h= 30.104$, $p<0.05$) al igual que en su proporción de CaCO₃ ($h= 37.326$, $p<0.05$) y Corg ($h= 37.326$, $p<0.05$) (Fig. 4).

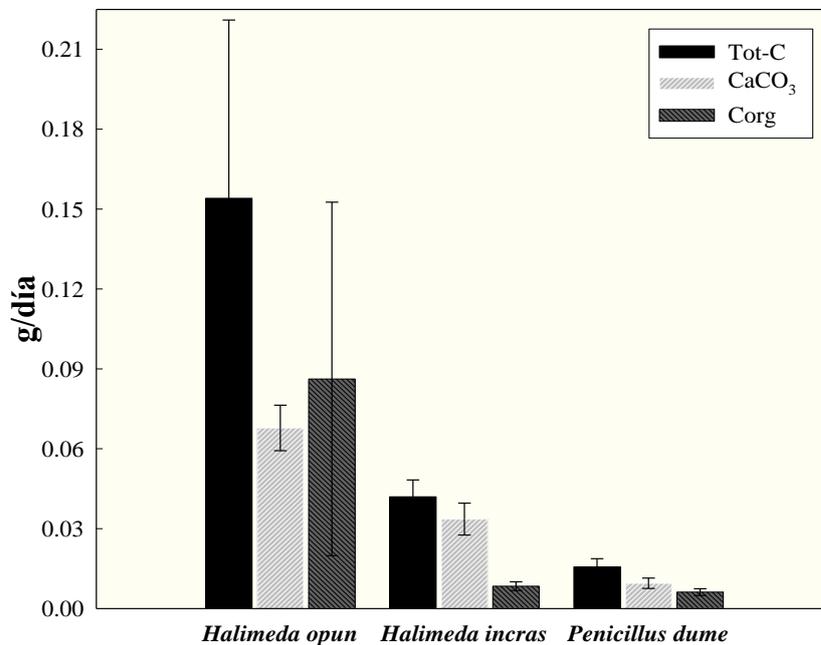


Figura 4. Tasa de crecimiento y error estándar por día de las especie de algas calcáreas verdes de “Isla Cerritos”, San Felipe, Yucatán, México.

Variación temporal.

La mayor tasa de crecimiento se presentó en marzo con (0.501 g/día), y el menor fue en diciembre con 0.029 g/día; sin embargo aunque la mayor tasa de crecimiento se dio en marzo el porcentaje de calcificación por día fue el menor de todo el año con un 45% (0.227 g/día) de CaCO_3 producido por día. Mientras que septiembre, registró el mayor porcentaje de calcificación por día de 73% (0.107 g/día) de CaCO_3 . Lo que demostró que existe diferencias significativa en la tasa de crecimiento entre meses ($h= 99.907$, $p<0.05$) al igual que en su proporción de CaCO_3 ($h= 89.635$, $p<0.05$) y Corg ($h= 78.937$, $p<0.05$) (Fig. 5).

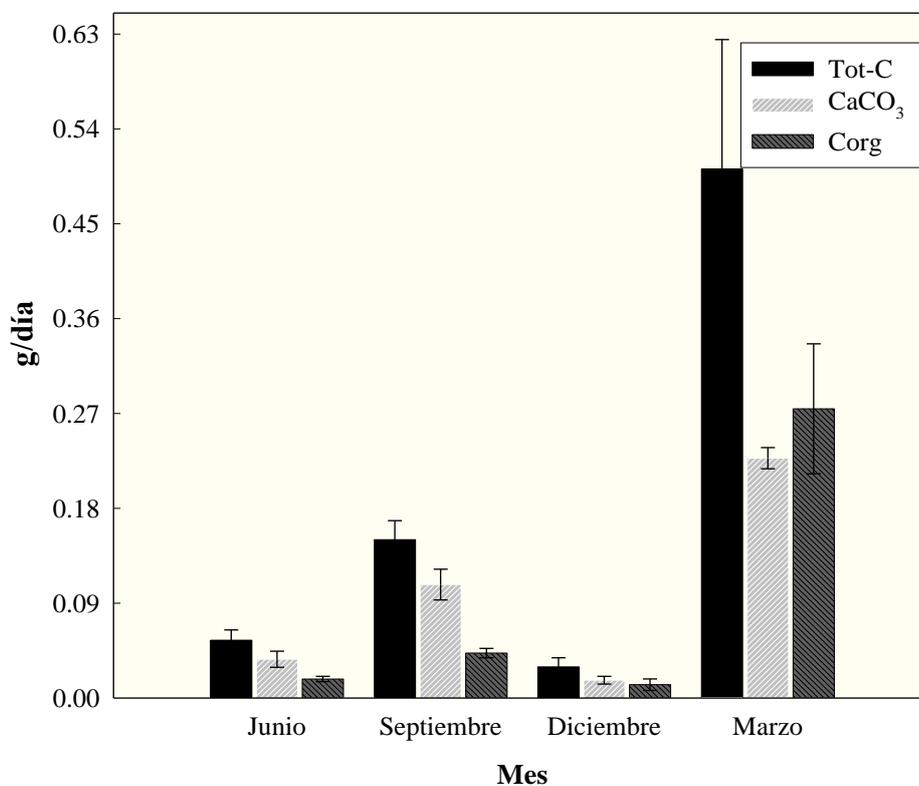


Figura 5. Tasa de crecimiento y error estándar al día por mes de las algas calcáreas verdes de “Isla Cerritos”, San Felipe, Yucatán, México.

La tasa de crecimiento de *Halimeda opuntia* presentó diferencia significativa entre los meses de muestreo ($h= 23.360$, $p<0.05$), al igual que *Halimeda incrassata* ($h= 88.773$, $p<0.05$). Para éstas dos especies la mayor tasa de crecimiento, se dio en marzo, donde *Halimeda opuntia* creció 0.371 g/día con un 32% (0.118 g/día) de CaCO_3 y *Halimeda incrassata* creció 0.119 g/día y con un 86% (0.101 g/día) de

CaCO₃, siendo mayor la proporción de CaCO₃ en *Halimeda incrassata* en su crecimiento de marzo. A diferencia de las algas del genero *Halimeda*, *Penicillus dumetosus* no presentó variación en su tasa de crecimiento por mes ($h= 3.086$, $p>0.05$), en septiembre presentó la mayor tasa de crecimiento de 0.027 g/día.

Variación Espacial.

Los dos sitios de muestreo presentaron diferencias significativas en su tasa de crecimiento ($h= 6.432$, $p<0.05$), “Cerritos 2” fue el de mayor tasa de crecimiento 0.1654 g/día, del cual el 40% (0.120 g/día) fue CaCO₃, en “Cerritos 1” la tasa de crecimiento por día al año fue menor 0.165 g/día del cual el 73% (0.120 g/día) fue CaCO₃ (Fig. 6).

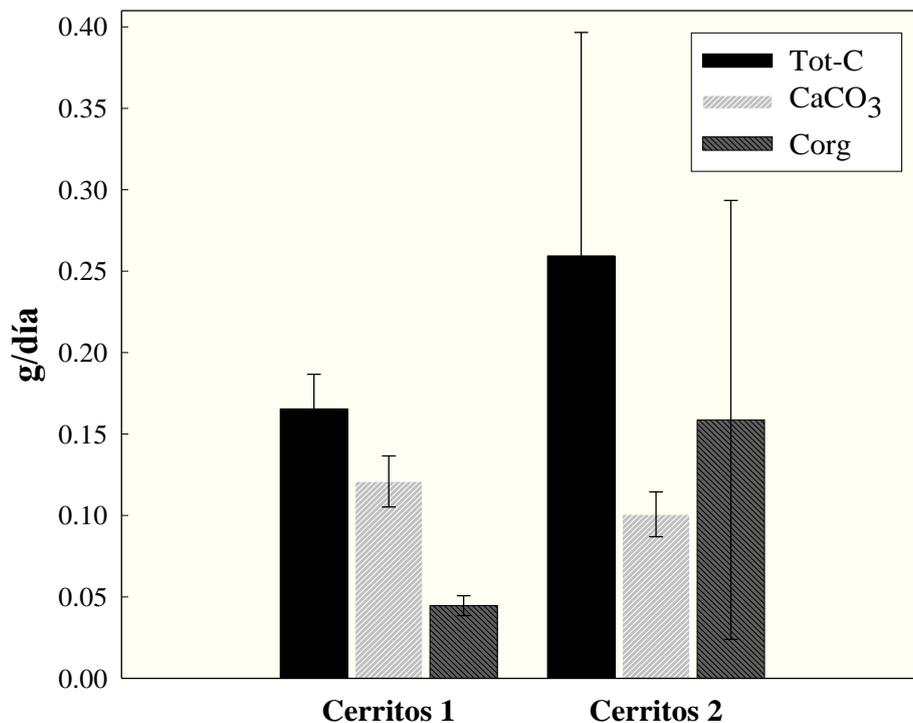


Figura 6. Tasa de crecimiento y error estándar al año de las algas calcáreas verdes en Cerritos 1 y Cerritos 2, San Felipe, Yucatán, México.

En los dos sitios el alga con mayor tasa de crecimiento fue *Halimeda opuntia*, (0.018 g/día), “Cerritos 1” presentó la mayor proporción de CaCO₃ con 79% mientras que en “Cerritos 2”, solo fue del 20% mostrando que existe una diferencia significativa en la tasa de crecimiento y su proporción de CaCO₃ y Corg entre “Cerritos 1” y “Cerritos 2” ($h= 31.074$, $p<0.05$). *Halimeda incrassata* y *Penicillus dumetosus* no

presentaron diferencia significativa en su crecimiento entre “Cerritos 1” y “Cerritos 2” ($h= 3.249$, $p>0.05$) (Fig. 7).

En los dos sitios el mes con mayor tasa de crecimiento total fue marzo, en “Cerritos 2” con (0.710 g/día), pero el mes con menor proporción CaCO_3 25% (0.245 g/día), a diferencia de “Cerritos 1” en el cual la proporción de CaCO_3 fue de más del 80% en todos los meses (Fig. 8).

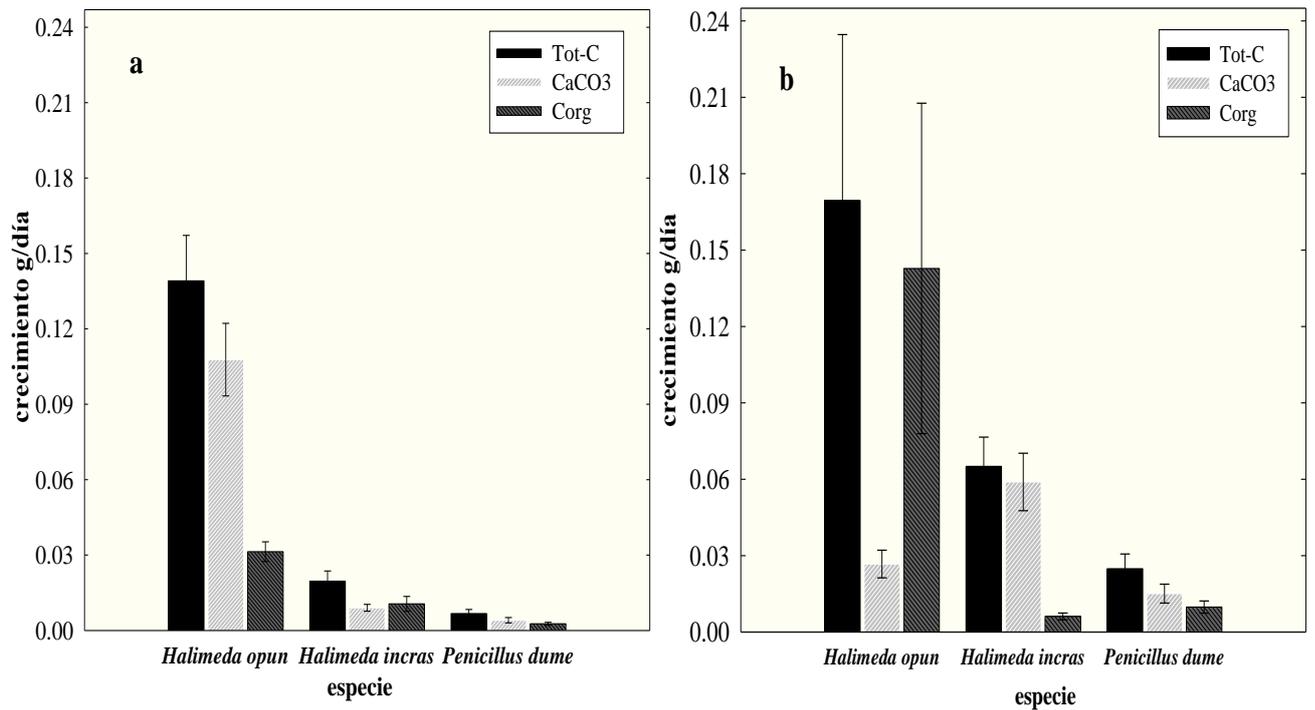


Figura 7. Tasa de crecimiento por día de las algas verdes calcáreas en los sitios de muestreo: Cerritos 1 y Cerritos 2, San Felipe, Yucatán, México.

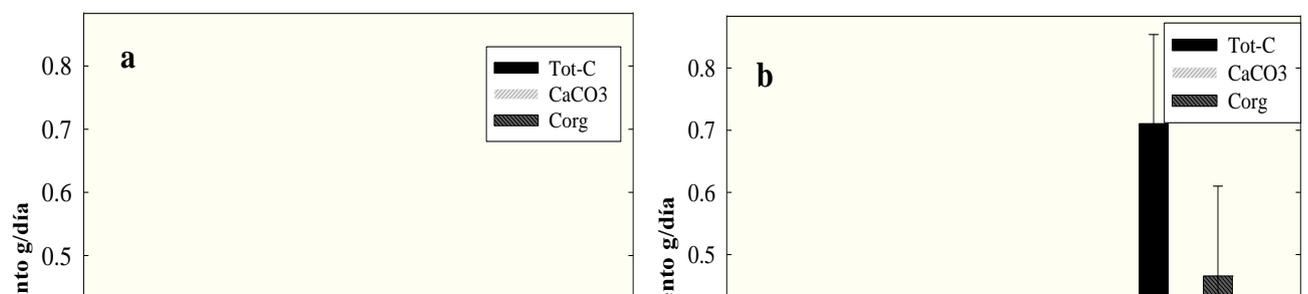


Figura 8. Tasa de crecimiento por mes de las algas verdes calcáreas en los sitios de muestreo: Cerritos 1 y Cerritos 2, San Felipe, Yucatán, México.

Producción

La producción anual de las algas verdes calcáreas de “Isla Cerritos” fue de 1084.269 g/m²/año, con una proporción del 85% (896.920 g/ m²/año) de CaCO₃. La especie que presentó la mayor producción total al año por m² fue *Halimeda opuntia* con 737.80 g/m²/año de materia orgánica, y 648.67 g/m²/año de CaCO₃. *Halimeda incrassata* fue la de menor producción al año con 68 g/m²/año de materia orgánica y 52.8716 g/m²/año de CaCO₃. Se encontró que existe diferencia significativa en la producción total, el CaCO₃ y Corg de las especies (F=4.501, p<0.05) (Fig. 9).

Variación temporal.

La mayor producción se presentó en septiembre con 4.014 g/m²/día con una producción de CaCO₃ de 3.646 g/m²/día, disminuyendo en diciembre el cual presentó la menor producción en todo el año de 1.248 g/m²/día y 0.505 g/m²/día de CaCO₃. Esta variación mostró diferencia significativa en la producción por meses (F= 5.544, p<0.05) (Fig. 10).

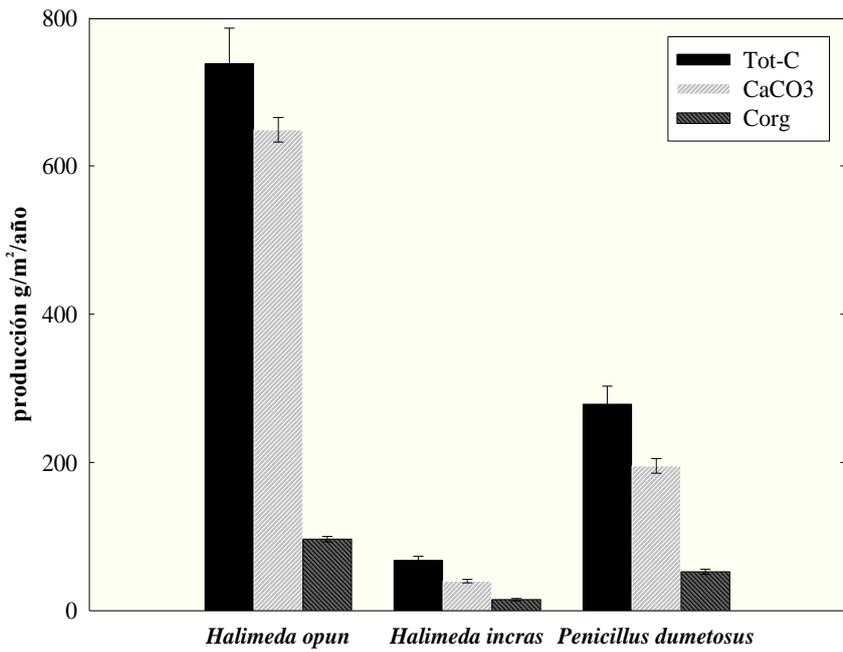


Figura 9. Producción anual y error estándar de las especie de algas calcáreas verdes de “Isla Cerritos”, San Felipe, Yucatán, México.

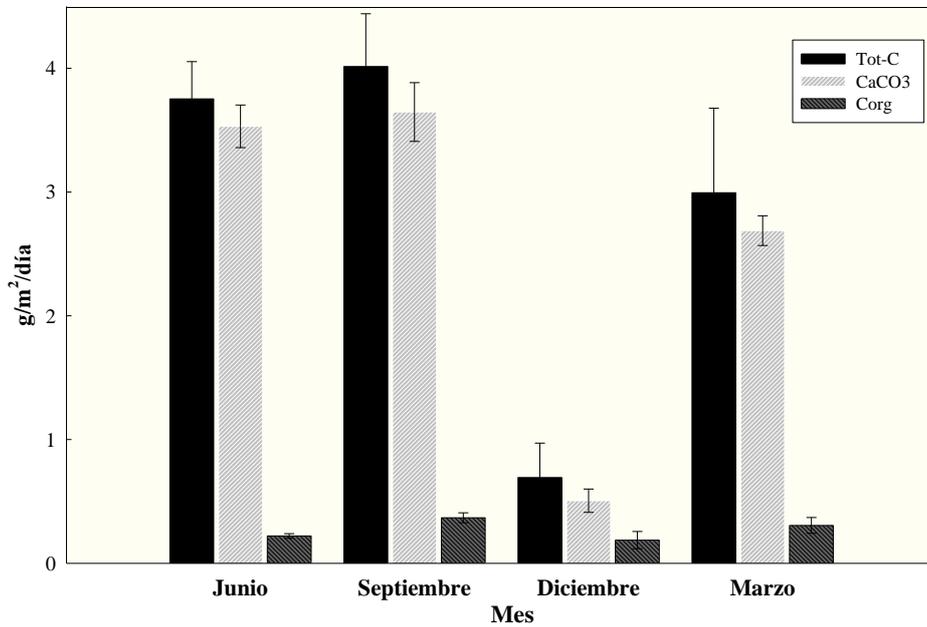


Figura 10. Producción y error estándar por mes de las algas calcáreas verdes de “Isla Cerritos”, San Felipe, Yucatán, México.

Variación espacial.

Espacialmente la producción total no presentó diferencias significativas entre sitios ($F=0.098$ y $p>0.05$), al igual que la producción de CaCO_3 ($F=1.787$ y $p>0.05$), en Cerritos 1 la producción anual fue de $561.075 \text{ g/m}^2/\text{año}$ con una producción de CaCO_2 de $535.501 \text{ g/m}^2/\text{año}$ (Fig. 11).

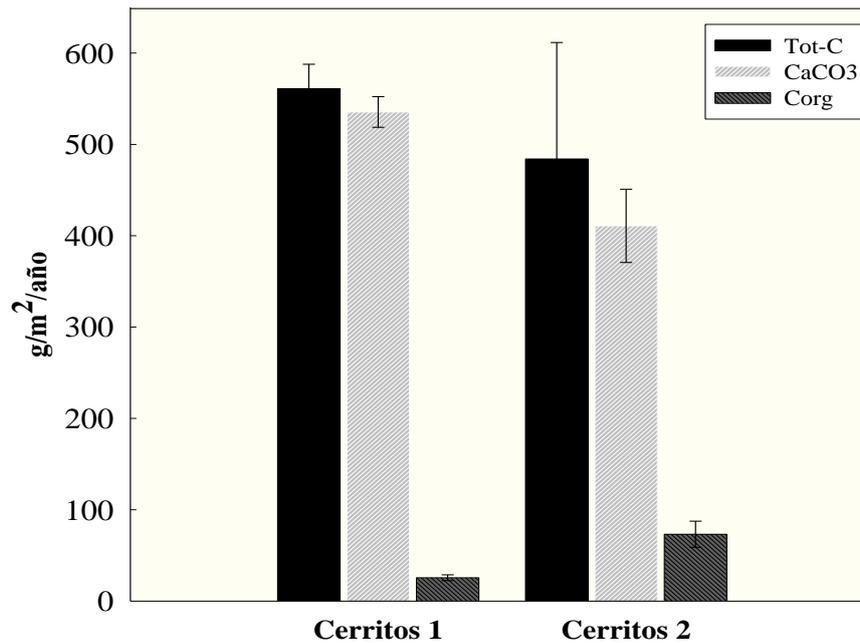


Figura 11. Producción y error estándar por sitio de las algas calcáreas verdes de “Isla Cerritos”, San Felipe, Yucatán, México.

En los dos sitios el alga con mayor producción fue *Halimeda opuntia* ($1.443 \text{ g/m}^2/\text{día}$), “Cerritos 1” presentó la mayor producción de CaCO_3 con 96% ($1.390 \text{ g/m}^2/\text{día}$), mientras que en “Cerritos 2”, la producción de CaCO_3 fue del 70% ($0.594 \text{ g/m}^2/\text{día}$), mostrando que existe una diferencia significativa en la tasa de crecimiento y su proporción de CaCO_3 y Corg entre “Cerritos 1” y “Cerritos 2” ($F= 31.074$ y $P=0.000$). *Halimeda incrassata* y *Penicillus dumetosus* no presentaron diferencia significativa en su crecimiento entre “Cerritos 1” y “Cerritos 2” ($F= 3.249$ y $p>0.05$) (Fig. 12).

Entre los dos sitios se encontró que existe diferencia en cuando a la producción total por mes, siendo junio en “Cerritos 1” el de mayor producción ($3.909 \text{ g/m}^2/\text{día}$) de esta producción el 97% fue CaCO_3 y el mes de menor producción fue diciembre

(0.021 g/m²/día), a diferencia de “Cerritos 2” donde marzo fue el mes con mayor producción (1.499 g/m²/día) de esta producción el 95% fue CaCO₃ y diciembre el de menor producción (0.402 g/m²/día) (Fig. 13).

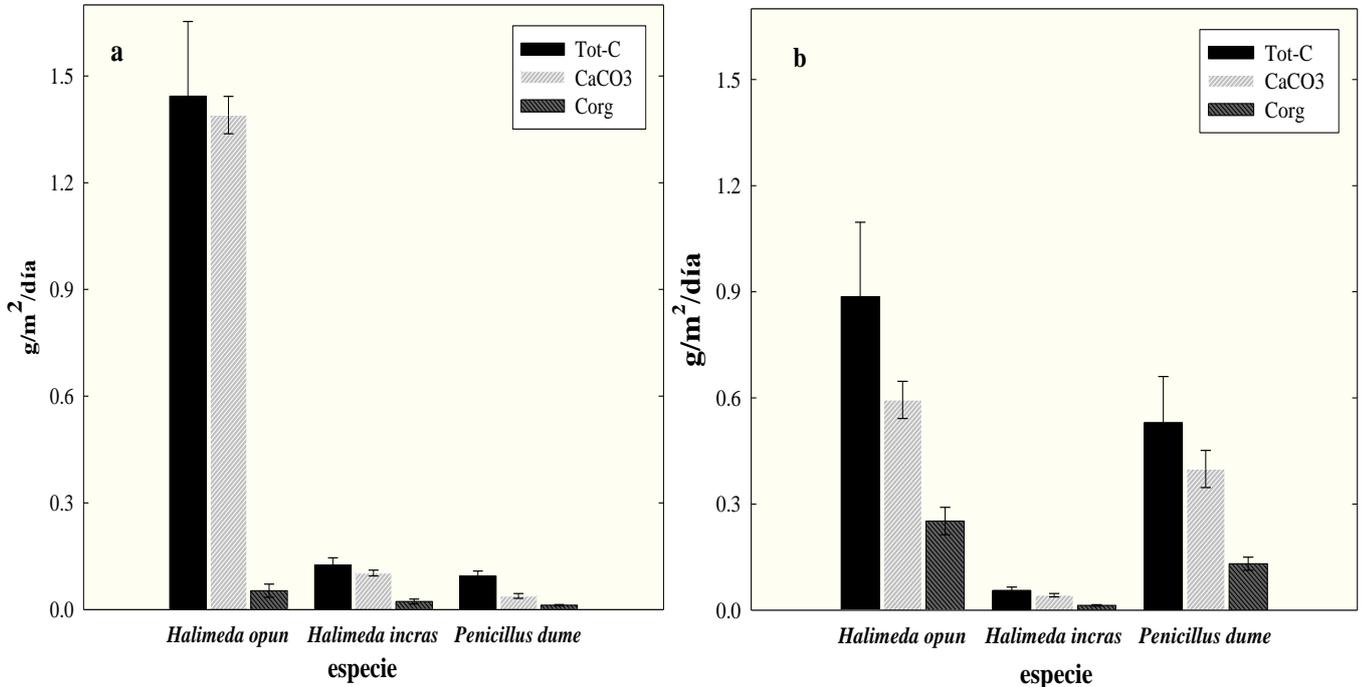


Figura 12. Producción por día de las algas verdes calcáreas en los dos sitios de muestreo: Cerritos 1 y Cerritos 2, San Felipe, Yucatán, México.

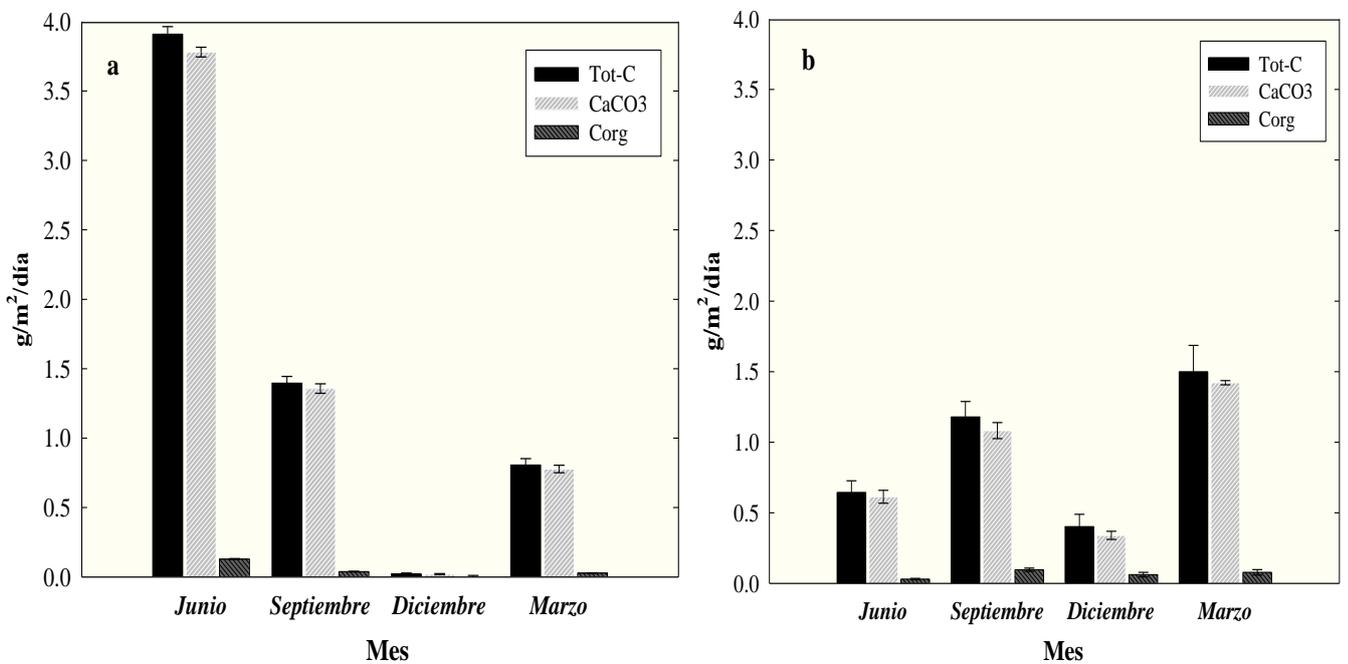


Figura 13. Producción por mes de las algas verdes calcáreas en los dos sitios de muestreo: Cerritos 1 y Cerritos 2, San Felipe, Yucatán, México.

Discusión

Las algas verdes calcáreas en el área de estudio presentan una alta tasa de crecimiento, tanto por día como por año (0.211 g/día y 77.307 g/año), dando un alto aporte de CaCO₃. Ésta tasa es mayor a la reportada en otras zonas del caribe y del mundo. En Florida se reporta una tasa de crecimiento de 0.121 g/día (Beach *et al.* 2003) y en Australia de 0.004 g/día (Multer 1988). Esto demuestra que las algas verdes calcáreas en el área de estudio son productores importantes de sedimentos carbonatados, así como componentes importantes de las praderas de pastos marinos, ya que juegan un papel importante en la producción de sedimentos carbonatados (Stark *et al.* 1969, Borowitzka y Larkum 1976, Littler *et al.* 1983, Bosnce 1987, Davis y Fourqurean 2001).

En la zona de estudio, al evaluar las tres especies presentes en la zona, se detectó que aunque *Halimeda opuntia* fue el alga con mayor tasa de crecimiento por día. Sin embargo, el alga con mayor proporción de CaCO₃ en su crecimiento en todo el año fue *Halimeda incrassata*, mostrando que existe una diferencia significativa en la tasa de crecimiento por día entre especies. Estas diferencias en el crecimiento que muestran las distintas especies de algas calcáreas, crea la necesidad de evaluar puntualmente el crecimiento y la proporción de CaCO₃ por especies ya que éstas responden de distinta manera a los estímulos externos como la disponibilidad de luz y temperatura (Beach *et al.* 2003).

Asimismo, la tasa de crecimiento mostró un patrón estacional con abundancias más altas durante el verano y abundancias bajas durante el invierno. Esto coincide con lo encontrado en otras zonas, donde se observa que la tasa de crecimiento y de CaCO₃ de algas calcáreas verdes se ve influenciada por la estacionalidad, encontrando una mayor proporción de CaCO₃ durante el verano y bajas durante el invierno, ya que la tasa de calcificación es directamente proporcional a la fotosíntesis, incrementando su tasa de calcificación en los meses con mayor exposición de luz. A pesar de que la zona de estudio es un área tropical la estacionalidad se ha observado en poblaciones de algas calcáreas en agua tropicales (Drew 1983, Multer 1988, Lirman y Biber

2000, Vroom *et al.* 2003, Collado-Vides *et al.* 2005, van Tussenbroek y van Dijk, 2007).

Con respecto a la variación espacial se detectó que en “Cerritos 1” la tasa de crecimiento fue menor a la obtenida de “Cerritos 2”, lo que pudiera deberse a que estuvo dominado por praderas de pastos marinos que pueden competir con *Halimeda* por espacio y nutrientes, numerosos estudios demuestran que existe una competencia directa entre las algas calcáreas y los pastos marinos (Davis y Fourqurean 2001, Barry *et al.* 2013) y que pueden limitar la luz disponible para la fotosíntesis de *Halimeda* y *Penicillus* (Davis y Fourqurean 2001) por lo que la composición y la estructura de las comunidades de pastos marinos, la profundidad y el sustrato, pueden afectar la tasa de crecimiento de las algas calcáreas (Davis y Fourqurean 2001, Barry *et al.* 2013).

Se encontró una diferencia muy marcada en la proporción de CaCO_3 de *Halimeda opuntia* por sitio y por mes, encontrando que esta alga en agosto fue el mes que más creció, pero que menos CaCO_3 produjo en sus tejidos, esto solo se presentó en Cerritos 2, ya que en la zona de Cerritos 1, la proporción de CaCO_3 , en los nuevos crecimientos fueron similares a los reportados en otros estudios del 80 al 90 % de CaCO_3 (Bohm 1973, Beach *et al.* 2003, Collado-Vides *et al.*, 2005, 2007, van Tussenbroek y van Dijk, 2007). Esta diferencia en su proporción de CaCO_3 , en Cerritos 2 puede estar relacionada con los factores intrínsecos del sitio.

Producción

La producción de las algas calcáreas verdes en el área de estudio ($896.920 \text{ g/m}^2/\text{año}$ de CaCO_3) fue mayor a la registrada en otras partes del Caribe y del mundo, en Puerto Morelos, Quintana Roo es de $815 \text{ g/m}^2/\text{año}$ de CaCO_3 (van Tussenbroek y van Dijk, 2007), en la Gran Barrera Arrecifal se registró una producción anual de $184.9 \text{ g/m}^2/\text{año}$ de CaCO_3 (Drew 1983), en Tahití, Payri (1988) mide una producción de $1.4 \text{ kg/m}^2/\text{año}$ de CaCO_3 , estos datos muestran la importancia de ésta área como productora de sedimentos carbonatados y su importancia como secuestradoras de carbono.

La mayoría de los estudios de producción de carbono realizados en algas verdes calcáreas se enfocan en una especie, por lo general en *Halimeda incrassata*, la cual es una de las algas más comunes en las lagunas arrecifales y en las praderas de pastos marinos (Wefer 1980, Drew 1983, Payri 1988, Collado-Vides *et al.* 2005, 2007). En el área de estudio se trabajó con *Halimeda opuntia*, *Halimeda incrassata* y *Penicillus dumetosus*, comparada con otras áreas, la producción de CaCO₃ de *Halimeda incrassata* fue similar a la reportada por Wefer (1980) de 50 g/m²/año e inferior a la reportada por van Tussenbroek y van Dijk, (2007) de 815 g/m²/año. Esta diferencia puede deberse a que el tamaño del área de estudio y el tiempo de muestreo (años), así como a las condiciones propias de cada área, *Halimeda incrassata* en el área de Isla Cerritos tuvo menor producción en todo el año. A diferencia de ésta, *Halimeda opuntia* fue el alga que presentó la mayor producción al año en el área, la cual fue similar a la reportada por Tussenbroek y van Dijk, (2007). Estos resultados muestran que la producción de las algas del género *Halimeda* es muy variada y que ésta producción no sólo depende la especie sino de las condiciones propias del área (Stark *et al.* 1969, Collado-Vides *et al.* 2005, 2007).

La producción de *Halimeda* y *Penicillus* mostró diferencias estacionales, con mayor producción en junio (verano), lo cual se correlacionan con altas temperaturas y luz (Ballesteros 1991, Vroom *et al.* 2003, Collado-Vides *et al.* 2005, 2007), mientras que la menor producción encontrada en diciembre se puede deber al desprendimiento de segmentos, los cuales aumenta cuando se encuentran expuestos a una mayor perturbación en su medio (Ballesteros 1991).

La producción anual que las algas calcáreas en “Isla Cerritos” presentaron, muestra que ésta es un área importante de producción de sedimentos carbonatados y de alta productividad. Éste estudio muestra que *Halimeda opuntia* representa en la zona más del 60% de la producción total, haciendo que ésta sea un buen indicador de la producción de CaCO₃. Razón por la cual es necesario conocer las posibles interacciones que puedan estar sucediendo entre éstas algas y los pastos marinos, así como con otros organismos como depredadores, la tasa de fotosíntesis de las algas calcáreas y su variación inter anual. Es primordial expandir el área de muestreo para

conocer zonas claves de producción y sedimentación de carbono, en la zona costera de Yucatán.

Referencias

- Andersson, A.J., F.T. Mackenzie y A. Lerman. 2005. Coastal ocean and carbonate systems in the high CO₂ world of the Anthropocene. *Am J Sci.* 305(9): 875-918.
- Ballesteros E. 1991. Seasonality of growth and production of a deep-water population of *Halimeda tuna* (Chlorophyceae, Caulerpales) in the North-western Mediterranean. *Bot Mar.* 34:291-301.
- Barry, S.C., T.K. Frazer y C.A. Jacoby. 2013. Production and carbonate dynamics of *Halimeda incrassata* (Ellis) Lamouroux altered by *Thalassia testudinum* Banks and Soland ex König: *J Exp Mar Biol Ecol.* 444: 73-80.
- Beach K., L. Walters., P. Vroom, C. Smith., J. Coyer y C. Hunter. 2003. Variability in the ecophysiology of *Halimeda* spp. (Chlorophyta, Bryopsidales) on Conch Reef, Florida Keys USA. *J Phycol.* 39: 633-643.
- Bohm E.L. 1973. Studies on the mineral content of calcareous algae. *B Mar Sci.* 23: 177-190.
- Borowitzka M.A. y A.W.D. Larkum. 1976. Calcification in the green algae *Halimeda*. I. An ultrastructure study of thallus development. *J Phycol.* 13: 6-16.
- Byers, S.C., E.L. Mills y P.L. Stewart. 1978. Comparison of methods of determining organic carbon in marine sediments, with suggestions for a standard method. *Hydrobiologia.* 58: 43-47.
- Chuc-Contreras A., I. Ortégón-Aznar y L. Collado-Vides. 2015. Variación temporal de la Biomasa y Proporción de Carbono Orgánico y CaCO₃ en las algas calcáreas Verdes *Halimeda* y *Penicillus* (Bryopsidales, Chlorophyta) en San Felipe, Yucatán, México. Datos no publicados.

- Collado-Vides, L., Caccia, V.G., Boyer, J.N., y Fourqurean, J.W. 2007. Tropical seagrass-associated macroalgae distributions and trends relative to water quality. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 73(3): 680-694.
- Collado-Vides L., L.M. Rutten y J.W. Fourqurean. 2005. Spatiotemporal variation of the abundance of calcareous green macroalgae in the Florida Keys: a study of synchrony within a macroalgal functional-form group. *J Phycol.* 41: 742-752.
- Davies, P. J. y J.F. Marshall. 1985. *Halimeda* bioherms—low energy reefs, northern Great Barrier Reef. *Proc. 5ta Int. Coral. Ref.* 1: 1-7.
- Davis, B.C. y J.W. Fourqurean. 2001. Competition between the tropical alga, *Halimeda incrassata*, and the seagrass, *Thalassia testudinum*. *Aquat Bot.* 71(3): 217-232.
- Díaz-Pulido, G., McCook, L.J., Larkum, A.WD., Lotze, H.K., Raven, J.A., Schaffelke, B., Smith, J.E. y Steneck, R.S. 2007. Vulnerability of macroalgae of the Great Barrier Reef to climate change. In *Climate Change and the Great Barrier Reef*. J.E. Johnson & P.A. Marshall, Eds.: 154-192.
- Drew, E.A. 1983. *Halimeda* biomass, growth rates and sediment generation on reefs in the central Great Barrier Reef Province. *Coral Reefs* 2: 101-10
- Dupont, S., J. Havenhand, W. Thorndyke, L. Peck y M. Thorndyke. 2008. Near-future level of CO₂-driven ocean acidification radically affects larval survival and development in the brittlestar ophiolithrix fragilis. *Mar Ecol-Prog Ser.* 373: 285-294.
- Fong P. y V. J. Paul. 2011. Coral reef algae. In: Dubinsky Z, Stambler N (eds) *Coral reefs: an ecosystem in transition*. Springer. 241-272.
- Freile D. y L. Hillis. 1997. Carbonate productivity by *Halimeda incrassata* in a land proximal lagoon, Pico Feo, San Blas, Panama. *Proc. 8th Int. Coral Reef Symp.* 1: 767-772.

- Hensley N.H., O.L. Elmasri., E.I. Slaughter., S. Kappus y P. Fong. 2013. Two species of *Halimeda*, a calcifying genus of tropical macroalgae, are robust to epiphytism by cyanobacteria. *Aquat Ecol.* 47: 433-440.
- Hillis L. 1997. Coral reefs from a calcareous green alga perspective, and a first carbonate budget. *Proc. 8th Int. Coral Reef Symp.* 1: 761-766.
- Hillis-Colinvaux, L. 1980. Ecology and taxonomy of *Halimeda*: primary producers of coral reefs. *Adv. Mar. Biol.* 17: 1-327.
- Hillis-Colinvaux, L. 1972. Reproduction in the calcareous green algae of coral reefs. *J Mar Biotechnol.* 14: 328-34.
- Hirota, J. y J.P. Szyper. 1975. Separation of total particulate carbon into inorganic and organic components. *Limnol Oceanogr.* 20: 896-900.
- Kleypas, J.A., R.W. Buddemeier., D. Archer., J.P. Gattuso., C. Langdon y B.N. Opdyke. 1999. Geochemical consequences of increased atmospheric CO₂ on coral reefs. *Science.* 284: 118-120.
- Koch M., G. Bowes., C. Ross and Zhang X. H. 2013. Climate change and ocean acidification effects on seagrasses and marine macroalgae: *Glob Change Biol.* 19: 103-132.
- Littler M.M. 1976. Calcification and its role among the macroalgae. *Micronesica* 12: 27-41.
- Multer H.G. 1988. Growth rate, ultrastructure and sediment contribution of *Halimeda incrassata* and *Halimeda monile*, Nonsuch and Falmouth Bays, Antigua, WI. *Coral Reefs.* 6(3-4): 179-186.
- Payri C.E. 1988. *Halimeda* contribution to organic and inorganic production in a Tahitian reef system. *Coral Reefs.* 6: 251-62.

Robledo, D. 1996. Conocimiento de la macroflora marina de interés económico de las costas de Yucatán. Informe final* del Proyecto B077. Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigaciones y de Estudios Avanzados-Mérida, dep. De Recursos del Mar Laboratorio de ficología Mérida, Yucatán, México

Sinutok S., R. Hill., M.A. Doblin., R. Wuhrer y P.J. Ralpa. 2012. Warmer more acidic conditions cause decreased productivity and calcification in subtropical coral reef sediment-dwelling calcifiers. *Limnol Oceanogr.* 56(4): 1200-1212.

Stark, L. M., L. Almodovar y R. W. Krauss. 1969. Factors affecting the rate of calcification in *Halimeda opuntia* (L.) Lamouroux and *Halimeda discoidea* decaisne. *J. Phycol.* 5, 305-312.

Stoddart DR. 1969. Ecology and morphology of recent coral reefs. *Biol Rev* 44: 433-498.

van Tussenbroek, B.I. y van Dijk J.K. 2007. Spatial and temporal variability in biomass and production of Psammophytic *Halimeda incrassata* (bryopsidales, chlorophyta) in a Caribbean reef lagoon. *J Phycol.* 43: 69-77.

Vroom P.S., C.M. Smith., J.A. Coyer., J.L. Walters., C.L. Hunter., K.S. Beach y J.E. Smith. 2003. Field biology of *Halimeda tuna* (Bryopsidales, Chlorophyta) across a depth gradient: comparative growth, survivorship, recruitment, and reproduction. *Hydrobiologia.* 501: 149-166.

Wefer G. 1980. Carbonate production by algae *Halimeda*, *Penicillus* and *Padina*. *Nature.* 285: 323-324.

Discusión General

En “Isla Cerritos” las algas calcáreas verdes presentaron una biomasa, tasa de crecimiento y producción, mayor a la reportada para otras zonas del caribe, los datos obtenidos de producción de CaCO_3 en el área concuerdan con otras zonas que reportan que entre el 80 y 90% de la producción total de estas algas se compone de CaCO_3 (Bohm 1973, Collado-Vides *et al.*, 2005, 2007, van Tussenbroek y van Dijk 2007).

Se observó una tendencia estacional en la biomasa, tasas de crecimiento y producción, la cual corrobora las conclusiones de otros estudios (Lirman y Biber 2000, Vroom *et al.*, 2003, Collado-Vides *et al.*, 2005, Tussenbroek y van Dijk 2007), los cuales describe un patrón claro de aumento de la abundancia, crecimiento y producción en todas las especies *Halimeda* y *Penicillus* durante la primavera-verano y un deterioro posterior otoño invierno.

La biomasa, tasas de crecimiento y producción anual de las algas calcáreas en “Isla Cerritos” presentaron, muestran que ésta es un área importante de producción de sedimentos carbonatados y de alta productividad. Estos pueden estar relacionados con la iluminación, la temperatura y las interacciones bióticas entre los pastos marinos. Este estudio muestra que *Halimeda opuntia* representa el 60% de la producción total, haciendo que esta sea un buen indicador de la producción de CaCO_3 .

Se recomienda realizar trabajos alternos que involucren el monitoreo de las praderas de pastos marinos, la tasa de fotosíntesis de las algas calcáreas y su variación inter anual, de la misma forma es primordial expandir el área de muestreo para conocer zonas claves de producción y sedimentación de carbono, debido a que existe una posibilidad de que la mayor parte del CaCO_3 producido se transporte por las corrientes que van este a oeste, a través del norte de la península de Yucatán o hacia mar abierto es necesario realizar estudios que nos permitan conocer la tasas de sedimentación y exportación de CaCO_3 debido a que no existen datos sobre la pérdida de sedimentos anual en el área.

Conclusión General

Biomasa

- Las algas verdes calcáreas en “Isla Cerritos” registraron una biomasa total de 1,087.2 g/m²/año.
- Entre aproximadamente 80 y 90% de la biomasa y producción total en “Isla Cerritos” fue CaCO₃.
- *Halimeda opuntia* tuvo la mayor biomasa durante todo el estudio con una media de 1,032.9 g/m² de la cual el 89% era CaCO₃ (919.5 g/m²)
- La mayor biomasa en “Isla Cerritos” se obtuvo en junio.
- Cerritos 2 fue el sitio con mayor biomasa del área (1,338.2 g/m²)
- Se encontraron diferencia en la biomasa por especie, por sitio y por mes.

Tasa de crecimiento

- La tasa de crecimiento total en “Isla Cerritos” al día fue de 0.211 g/día, y al año de 77.307 g/año de los cuales la proporción de CaCO₃ fue de 0.110 g/día y 40.478 g/año.
- El alga con mayor tasa de crecimiento por día fue *Halimeda opuntia* con 0.154 g/día, del cual el 54% (0.067g/día) fue CaCO₃.
- La mayor tasa de crecimiento se presentó en marzo con (0.501 g/día), y el menor fue en diciembre (0.029 g/día).
- Cerritos 2 fue el sitio de mayor tasa de crecimiento 0.1654 g/día, del cual el 40% (0.120 g/día) fue CaCO₃.

Producción

- La producción anual de las algas verdes calcáreas de “Isla Cerritos” fue de 1084.269 g/m²/año, con una proporción del 85% (896.920 g/m²/año) de CaCO₃.

- *Halimeda opuntia* presentó la mayor producción total de materia orgánica (737.80 g/m²/año), y CaCO₃ (648.67 g/m²/año) al año.
- La mayor producción se presentó en septiembre (4.014 g/m²/día) con una proporción de CaCO₃ de 3.646 g/m²/día.
- La mayor producción de las algas calcárea fue en Cerritos 1 de 561.075 g/m²/año con una producción de CaCO₃ de 535.501 g/m²/año.