

Comunidades de macroalgas de fondo duro: distribución espacial en la laguna arrecifal del Banco Chinchorro, México

Hard bottom macroalgae communities: spatial distribution in the reef lagoon of Chinchorro Bank, Mexico

Daniel Torruco^{1,*} & M. Alicia González-Solis¹

¹Centro de Investigación y Estudios Avanzados del I.P.N. Unidad Mérida. Km. 6 Antigua Carr. a Progreso. A.P. 73 CORDEMEX, Mérida, Yucatán, México.

*Corresponding author: dantor@cinvestav.mx

RESUMEN

Se analizaron las macroalgas de fondo duro en 17 sitios de la laguna arrecifal de la Reserva de la Biosfera de Banco Chinchorro. Se registraron 36 especies. *Canistrocarpus cervicornis* fue la especie dominante. Los intervalos de diversidad estuvieron entre 1,5 a 3,31 bits·ind⁻¹, el área más diversa estuvo en la parte sur de la laguna donde existía mayor presencia de sustratos coralinos. La similitud de los sitios obtenido con el índice de Morisita, presenta grupos diversos y heterogéneos que tipifican áreas específicas dentro de la laguna arrecifal, principalmente las cercanas a barlovento. El análisis canónico muestra la dependencia de los sitios hacia los factores ambientales; sin embargo, la salinidad y la temperatura de la superficie son restrictivas para las algas del fondo duro. Se presenta una alta correlación mayor de 0,9 entre los parámetros ambientales y los tres primeros componentes principales del sistema.

Palabras clave: macroalgas, arrecifes de coral, distribución espacial, Caribe mexicano.

ABSTRACT

Hard-bottom macroalgae were analyzed in 17 sites of the reef lagoon of Chinchorro Bank Biosphere Reserve. 36 species were recorded. *Canistrocarpus cervicornis* was the dominant species. The diversity intervals were between 1.5 and 3.31 bits·ind⁻¹, the most diverse area was in the southern part of the lagoon where there was a greater presence of coral substrates. The similarity of the sites obtained with the Morisita index, presents diverse and heterogeneous groups that typify specific areas within the reef lagoon, mainly those near windward. Canonical analysis shows the dependence of sites on environmental factors; However, salinity and surface temperature are restrictive for hard-bottom algae. There is a high correlation greater than 0.9 between the environmental parameters and the first three main components of the system.

Keyword: macroalgae, coral reefs, spatial distribution, Mexican Caribbean.

INTRODUCCIÓN

La vegetación es uno de los principales componentes de los arrecifes de coral y tiene muchas funciones (León-Álvarez *et al.* 2017, León-Álvarez *et al.* 2019). Las más significativas son: estabilización del sustrato (Littler *et al.* 1983); como

fuente de alimento para un gran número de herbívoros (Humphries *et al.* 2014, Suchley *et al.* 2016, Díaz-Ruíz *et al.* 2018), como fijadores de elementos como nitrógeno, vital para el reciclaje de elementos y disponibilidad para otros grupos (Lapointe *et al.* 1984, Fonseca *et al.* 2018); también sirven como estructura que proporcionan sitios

de asentamiento para epífitas, superficies para capas microbianas y protección para animales pequeños como moluscos, equinodermos, artrópodos, larvas y juveniles de peces (Keeney 1999, Aguilera-Pérez & de la Cruz-Francisco 2017); además son sustrato para el asentamiento de larvas de coral y contribuyen a la construcción y consolidación de arrecifes al depositar calcita (una forma de CaCO_3), formando bordes de algas y cementando esqueletos de coral (Berner 1990, Garduño-Solórzano *et al.* 2005, González-Gandara *et al.* 2007, Luna-Ortega *et al.* 2017). Algunas especies, como *Halimeda* spp. y *Penicillus* spp. depositan aragonita (como CaCO_3), formando arena y sedimentos, y participando activamente en los procesos de destrucción o construcción de arrecifes (Torruco 1995, Ortégón-Aznar *et al.* 2009, Litter & Littler 2013, Hall *et al.* 2022); también sus patrones comunitarios han sido utilizados como grupo sensible a estrés ambiental (Han *et al.* 2023) En los ecosistemas arrecifales, la flora marina está representada principalmente por macroalgas ya que este grupo tiene las mayores diversidades. Aunque otras fanerógamas también ocupan grandes extensiones en los fondos de los arrecifes, incluyendo *Thalassia testudinum*, *Syringodium filiforme* y *Diplantera wrightii* (de la Lanza & Tovilla 1986, Alcolado *et al.* 2010, Gómez-Cubillos *et al.* 2015).

Gómez-Márquez (2023) resume la importancia de evaluar las comunidades, enfatizando que los estudios proporcionan la información necesaria para formular hipótesis sobre la relación entre factores bióticos y abióticos en su propia estructuración. Una comprensión detallada de los descriptores ecológicos en los estudios de referencia también es necesaria e importante para definir estrategias de conservación y uso sostenible para las áreas de arrecifes (Pitman *et al.* 2014). Esto se debe a que permiten la identificación y evaluación de las interacciones biológicas más significativas entre la comunidad y el medio ambiente, proporcionando una base sólida para planificación y gestión integrada y multisectorial de los recursos naturales en los arrecifes de coral.

En el área existen numerosos trabajos sobre las macroalgas arrecifales que van desde listas de algunos grupos o de la flora ficológica total (Mateo-Cid *et al.* 2006, Cetz-Navarro *et al.* 2008), hasta patrones de distribución de también algún grupo o de la flora total (Collado-Vides *et al.* 1995, Ortega *et al.* 2001, Garduño-Solórzano *et al.* 2005) En un esfuerzo por generar este tipo de datos, inicialmente se realizó un estudio de la distribución espacial y composición de macroalgas bentónicas en fondos blandos (González-Solis & Torruco 2015) y ahora se presenta este trabajo de fondos duros. Esta estrategia lleva la finalidad de tener información de la vegetación ficológica en todo el arrecife de Banco Chinchorro para posteriormente relacionar esta estructura, en conjunto, con los factores

ambientales, con la esperanza de desarrollar una herramienta útil para la planificación ecológica en la Reserva de la Biosfera Banco Chinchorro.

MATERIALES Y MÉTODOS

ÁREA DE ESTUDIO. Banco Chinchorro fue declarado Reserva de la Biosfera el 19 de julio de 1996 y es una formación con forma de atolón ubicada a 24 km de la costa sureste de la Península de Yucatán, en el área zoogeográfica noroeste del Caribe (Fig. 1, Tabla 1). Un canal de 1000 m de profundidad separa la formación del continente. Es el arrecife más grande de México con una superficie total, incluyendo laguna y barrera, de 814,2 km² (Torruco *et al.* 2003). El atolón tiene cuatro islas y una gran variedad de hábitats, incluyendo: una red de islotes de manglares entre los cayos de arena, una laguna de arrecife poco profunda con un gradiente batimétrico sur-norte, microatolones de coral en toda la laguna, formaciones de coral altamente desarrolladas en su porción sur y lado de sotavento y pendientes empinadas de 500 m en el lado de barlovento.

TABLA 1. Posición geográfica de los sitios y fecha del muestreo/ Geographical position of sites and sampling date.

Sitio	Latitud N	Longitud O	Fecha
1	18°23'10,69	87°23'8,88	17 abril
2	18°24'56,57	87°25'0,64	17 abril
3	18°26'9,21	87°24'39,02	18 abril
4	18°25'17,19	87°22'42,32	18 abril
5	18°25'40,45	87°20'12,73	19 abril
6	18°26'50,45	87°19'83,57	19 abril
7	18°33'43,48	87°20'10,59	18 junio
8	18°35'0,46	87°17'35,92	19 junio
9	18°36'44,35	87°18'36,78	19 junio
10	18°43'28,99	87°15'57,56	18 agosto
11	18°41'44,48	87°15'47,65	18 agosto
12	18°45'36,01	87°18'35,13	17 agosto
13	18°39'6,17	87°15'51,12	19 agosto
14	18°39'6,51	87°18'44,29	19 agosto
15	18°37'39,23	87°20'39,27	19 agosto
16	18°35'22,32	87°20'43,13	17 junio
17	18°27'55,52	87°22'38,79	17 junio

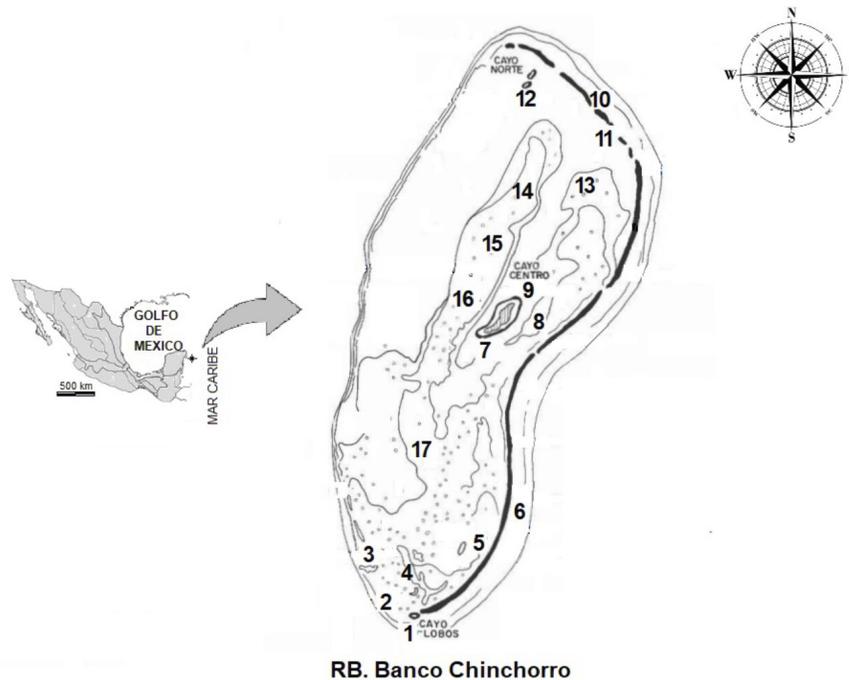


FIGURA 1. Localización del área de estudio. Se muestra la posición geográfica de los sitios del muestreo por fototranssectos. / Location of the study area. The geographic position of the sampling sites by phototransects is shown.

MUESTREO. El muestreo se realizó en diferentes momentos durante 2018 utilizando transectos fotográficos de 20 m de largo a una altura de 80 cm del fondo (Torruco 1995, Torruco *et al.* 2003, González-Solís *et al.* 2018) con una cámara Nikonos V. El muestreo se realizó en 17 sitios en el Banco (2 transectos por sitio y 36 fotografías por transecto haciendo un total de 1224 fotos, de las cuales se desecharon 103 por fuera de foco), en un intervalo de profundidad de 1 a 27 m. Aunado a la fotografía, se realizó una recolección selectiva de macroalgas para su identificación en el laboratorio (Taylor 1960, Litter *et al.* 1989, Mateo-Cid *et al.* 2006, Mateo-Cid *et al.* 2013, León-Álvarez *et al.* 2017, León-Álvarez *et al.* 2019, Pedroche & Senties 2020), lo que sirvió como base de referencia para la fotointerpretación. Se registró la temperatura, salinidad y oxígeno disuelto de cada punto de muestreo y en diferentes estratos. Los estratos de agua utilizados para los datos de macroalgas de fondo duro fueron: Superficie, 5 m, 10 m y 15 m. Todos los datos se obtuvieron con una sonda multiparámetrica YSI185.

Se definieron ocho grupos con características similares utilizando formas de vida y crecimiento similar: (a) – ramificada, organismos que crecen en pequeñas agregaciones con tallos laminares o cilíndricos; (c) – incrustantes, organismos que crecen adheridos al sustrato y con tallos

que depositan cantidades menores o mayores de carbonato cálcico; (ac) – calcáreas articuladas, organismos con tallos erectos y depósito de carbonato cálcico, excepto en las articulaciones; (rc) rizoidales calcáreos, organismos erectos fijados al fondo por rizoides con tallos muy calcificados; (f) - filamentosas, organismos con tallos que forman filas de células y que generalmente crecen en agregaciones; l) – laminares, organismos cuyo tallo forma una lámina con o sin pliegues conspicuos; (m) – modular, organismos que crecen a base de corredores y forman módulos conspicuos; y (t) – céspedes, organismos que crecen en forma de alfombras sobre el sustrato. La finalidad de estos grupos fue para definir si algunos predominaba en alguna de las zonas de la laguna y podría dar información sobre esta.

Análisis de datos. Los datos se utilizaron en diferentes análisis numéricos. La dominancia se determinó utilizando el criterio jerárquico de Orlóci (1978) y la diversidad biológica se cuantificó con el índice de Shannon-Wiener (Magurran 1988). Los sitios se clasificaron con un índice de similitud de Morisita utilizando el criterio de enlace flexible de Lance y Williams con una $\beta = 0,25$ (Pielou 1984). Se utilizó el análisis de correlación canónica para organizar sitios, especies y factores ambientales (Ludwing & Reynolds 1990). Se realizó una correlación no paramétrica con una prueba de Spearman

para probar las relaciones entre los parámetros ambientales y la densidad fisiológica de la flora (Ludwing & Reynolds 1990). Finalmente, para generar un patrón global en macro descriptores del grupo de las macroalgas (es decir, riqueza y diversidad de especies) se formularon modelos de distribución espacial utilizando un semivariograma con interpolación de valor y produciendo isoclinas con un interpolador universal Kriging (Henríquez *et al.* 2013, Gutiérrez -López *et al.* 2011, Porras-Velázquez 2017); para no interpolar sitios sin datos, se colocó una máscara en la figura.

RESULTADOS

Se registraron un total de 36 especies. Las especies dominantes en los fondos coralinos fueron *Canistrocarpus cervicornis* (48,46 %). *Lobophora variegata* (35,42 %) y *Turbinaria turbinata* (6,77 %), con un porcentaje acumulado del 90,6 %. Las especies más frecuentes fueron: *Dictyota bartayresiana* con 14 de 17 sitios (82 %); *Bostrychia montagnei* en 13 sitios (76 %); y *Lobophora variegata* y *Halimeda discoidea* en 12 sitios (70 %) (Tabla 2).

TABLA 2. Dominancia de las macroalgas en la laguna arrecifal de Banco Chinchorro. El índice de dominancia sigue el criterio de la jerarquía cuadrática de Orlocí. Se muestran tanto la frecuencia como la forma de crecimiento. / Algae dominance in the Banco Chinchorro reef lagoon. The dominance index follows the Orlocí quadratic hierarchy criterion. Both the frequency and the form of growth are shown.

Grupo	Especie	Dominancia (%)	Frecuency	Forma
Ochrophyta	<i>Canistrocarpus cervicornis</i> (Kützting) De Paula & De Clerck, 2006	48,461	11	an
Ochrophyta	<i>Lobophora variegata</i> (JV. Lamouroux)Womersley ex EC. Oliveira, 1977	35,426	12	l
Ochrophyta	<i>Turbinaria turbinata</i> (Linnaeus) Kuntze, 1898	6,771	8	l
Ochrophyta	<i>Colpomenia sinuosa</i> (Mertens ex Roth) Derbès & Solier, 1851	3,609	2	t
Chlorophyta	<i>Halimeda opuntia</i> (Linnaeus) JV Lamouroux, 1816	2,219	2	cr
Chlorophyta	<i>Cladophoropsis membranacea</i> (Hofman Bang ex C, Agardh) Børgesen, 1905	1,13	1	F
Rhodophyta	<i>Amphiroa rigida</i> JV Lamouroux, 1816	0,956	1	ca
Chlorophyta	<i>Udotea occidentalis</i> A. Gepp & Es Gepp, 1911	0,537	1	cr
Chlorophyta	<i>Caulerpa sertularioides</i> (SG Gmelin) M. Howe, 1905	0,316	3	M
Ochrophyta	<i>Stypopodium zonale</i> (JV Lamouroux) Papenfuss, 1940	0,199	3	L
Chlorophyta	<i>Halimeda incrassata</i> (J. Ellis) JV Lamouroux, 1816	0,185	1	cr
Chlorophyta	<i>Halimeda tuna</i> (J. Ellis & Solander) JV Lamouroux, 1816	0,082	7	cr
Ochrophyta	<i>Dictyota bartayresiana</i> JV Lamouroux, 1809	0,074	14	a
Chlorophyta	<i>Udotea wilsonii</i> A. Gepp, ES Gepp & MA Howe, 1911	0,022	1	cr
Chlorophyta	<i>Halimeda discoidea</i> Decaisne, 1842	0,008	12	cr
Rhodophyta	<i>Bostrychia montagnei</i> Harvey, 1853	0,008	13	a
Rhodophyta	<i>Palisade perforata</i> (Bory) KW Nam, 2007	↓	11	a
Rhodophyta	<i>Laurencia obtusa</i> (Hudson) JV Lamouroux, 1813	↓	1	a
Chlorophyta	<i>Neomeris annulata</i> Dickie, 1874	↓	11	t
Chlorophyta	<i>Rhipilia tormentosa</i> Kützting, 1858	↓	2	a
Rhodophyta	<i>Amphiroa brasiliana</i> Decaisne, 1842	↓	1	ca
Rhodophyta	<i>Amphiroa fragilissima</i> (Linnaeus) JV Lamouroux, 1816	↓	2	ca
Rhodophyta	<i>Amphiroa tribulus</i> (J. Ellis & Solander) JV Lamouroux, 1816	↓	1	ca
Chlorophyta	<i>Avrainvillea asarifolia</i> Børgesen, 1909	↓	1	cr
Chlorophyta	<i>Avrainvillea rawsoni</i> (Dickie) M. Howe, 1907	↓	1	cr
Chlorophyta	<i>Caulerpa racemosa</i> (Forsskal) J. Agardh, 1873	↓	1	m

Grupo	Especie	Dominancia	Frecuency	Forma
		(%)		
Rhodophyta	<i>Ganonema farinosum</i> (JV lamouroux) K.-C.Fan & Y.-C. Wang, 1974	↓	2	cr
Rhodophyta	<i>Mesophyllum mesomorphum</i> (Foslie) W. H. Adey, 1970	↓	1	c
Rhodophyta	<i>Neogoniolithon strictum</i> (Foslie) Setchell & LR Mason, 1943	↓	1	ca
Ochrophyta	<i>Padina santae-crucis</i> Børgesen, 1914	↓	6	l
Chlorophyta	<i>Rhipocephalus phoenix</i> (J. Ellis & Solander) Kützing, 1843	↓	5	cr
Ochrophyta	<i>Sargassum hystrix</i> J. Agardh, 1847	↓	10	a
Ochrophyta	<i>Sargassum vulgare</i> C. Agardh, 1820	↓	5	a
Rhodophyta	<i>Lithophyllum prototypum</i> (Foslie) Foslie, 1905	↓	3	c
Chlorophyta	<i>Udotea flabellum</i> (J. Ellis & Solander) M. Howe, 1904	↓	3	cr
Chlorophyta	<i>Valonia ventricosa</i> J. Agardh, 1887	↓	3	t

(a) – ramificada, (c) – incrustante, (ac) – calcárea articulada, (rc) rizoidal calcárea, (f) - filamentosa, (l) – laminar, (m) – modular, (t) – césped. ↓ inferior a 0,0001

Con relación a la forma de crecimiento, los más frecuentes fueron organismos ramificados (41,1 %). Los menos frecuentes fueron los organismos filamentosos (0,61 %). La mayor riqueza de especies se registró en el sitio uno (15 especies) en la parte norte-central de la laguna de arrecife. Los valores de riqueza de especies más bajos se registraron en la localidad 16 (4 especies) (Tabla 3). El valor de diversidad más alto fue en la estación 1 (3,31 bits·ind⁻¹) y el más bajo fue en 16 (1,5 bits·ind⁻¹). La uniformidad fue mayor en la estación 6 (0,91) y más baja en la estación 8 (0,54). La redundancia, utilizada como medida de la heterogeneidad de la abundancia, tuvo su valor más alto en la estación 8 (0,51) y el más bajo en 6 (0,13) para la comunidad del fondo de coral (Tabla 3).

El índice de Morisita produjo cinco agrupaciones a un nivel de similitud del 50 %. El primero tenía tres elementos (1, 12, 4) en las zonas sur y norte. El segundo era un grupo solitario en la estación 6 que incorporaba los niveles más bajos del primer conglomerado, y el tercero era una paridad entre las estaciones 8 y 10, ambas muy cerca de barlovento. El cuarto grupo es el más grande ya que incluye 6 sitios (2, 11, 5, 3, 16 y 17) ubicados en toda la laguna de arrecife y sin ningún patrón aparente. El último grupo contiene cinco estaciones (7, 14, 9, 13 y 15) ubicadas alrededor de Cayo Centro (Fig. 2).

El análisis de correlación canónica (CCA) para el fitobentos produjo un patrón donde la mayoría de las especies y estaciones estuvieron dispersas, mientras que la mayoría de los parámetros para los cuatro estratos de la columna de agua

TABLA 3. Diversidad de las Macroalgas en la laguna arrecifal de Banco Chinchorro. Se presentan la riqueza, diversidad, diversidades máximas, mínimas, la equitatividad y la redundancia. / Algae diversity in the reef lagoon of Chinchorro Bank. Shown the richness, diversity, the maximum and minimum diversity, the evenness and the redundancy.

Sitios	S	D	Dmx	Dmin	E	R
1	15	3,31	3,91	0,80	0,85	0,19
2	12	3,03	3,59	1,02	0,85	0,22
3	9	2,16	3,17	0,71	0,68	0,41
4	6	2,04	2,59	0,50	0,79	0,26
5	13	2,61	3,70	0,62	0,71	0,35
6	7	2,55	2,81	0,81	0,91	0,13
7	11	2,12	3,46	0,30	0,61	0,42
8	11	1,87	3,46	0,30	0,54	0,51
9	7	1,96	2,81	0,36	0,70	0,35
10	9	2,24	3,17	0,98	0,71	0,43
11	7	2,31	2,81	0,46	0,82	0,21
12	8	2,36	3,00	0,88	0,79	0,30
13	5	2,07	2,32	0,98	0,89	0,19
14	6	2,12	2,59	0,78	0,82	0,25
15	5	2,07	2,32	0,98	0,89	0,19
16	4	1,53	2,00	0,77	0,76	0,38
17	8	1,92	3,00	0,22	0,64	0,39
Total	36	3,54	5,17	0,21	0,69	0,33

se agruparon en un solo cuadrante. Los parámetros exhiben una fuerte relación entre sí y especialmente con los estratos de agua donde fueron identificados. Este fue el caso de la temperatura y la salinidad a 5 m, o la temperatura, la salinidad y el oxígeno disuelto a 15 m. Sin embargo, el oxígeno disuelto a 10 m y la salinidad superficial marcaron los límites en las relaciones entre parámetros, sitios y especies (Fig. 3). La correlación múltiple entre los parámetros muestra coeficientes muy altos, mayores que 0,9, en los tres componentes principales. Esto significa que estos tres componentes tienen la misma importancia en el ordenamiento espacial de las especies-sitios y que sus interacciones son muy fuertes.

La correlación no paramétrica de Spearman entre los parámetros y la densidad de especies de macroalgas en fondos duros produjo bajos coeficientes. Ninguno fue mayor de 0,65 para la correlación positiva más alta y -0,54 para la correlación negativa más baja. Los coeficientes máximos se producen con la salinidad superficial y las correlaciones más bajas se producen con la temperatura superficial (Tabla 4).

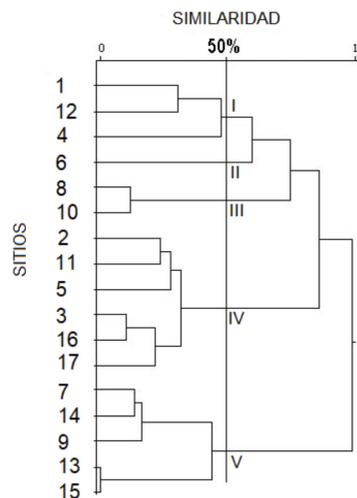


FIGURA 2. Dendrograma de similitud de los sitios de muestreo dado por el índice de Morisita. Se muestran los 5 grupos obtenidos al 50 % de similitud. / Dendrogram of similarity of the sampling sites given by the Morisita index. The 5 groups obtained at 50% similarity are shown.

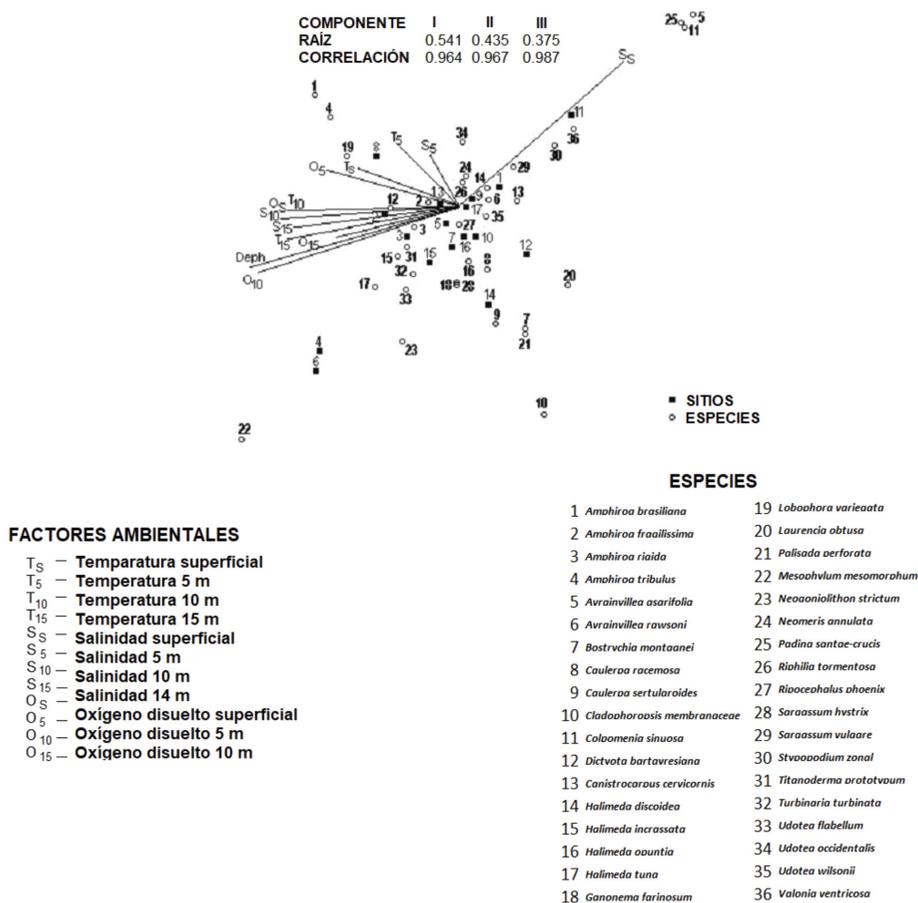


FIGURA 3. Ordenación tridimensional canónica de los sitios de muestreo, factores ambientales (temperatura, salinidad y oxígeno disuelto) y las macroalgas. Los factores ambientales se refieren a 4 niveles de profundidad: superficie, 5, 10 y 15 m. m. / Three-dimensional canonical ordination of sampling sites, environmental factors (temperature, salinity and dissolved oxygen) and macroalgae. Environmental factors refer to 4 depth levels: surface, 5, 10 and 15 m.

TABLA 4. Coeficientes de correlación de Spearman entre los parámetros ambientales (Temperatura, Salinidad y Oxígeno disuelto) y la densidad de especies. / Spearman's correlation coefficients between the environmental factors (Temperature, Salinity and Oxygen) and species density.

ESPECIES	FACTORES DEL AMBIENTE Y PROFUNDIDAD												
	Profundidad	ST	T 5m	T 10 m	T 15 m	SS	S 5m	S 10m	S 15 m	O ₂ S	O ₂ 5 m	O ₂ 10 m	O ₂ 15 m
<i>Amphiroa brasiliana</i>	0,48	0,50	0,44	0,51	0,55	0,36	0,34	0,60	0,62	0,57	0,48	0,43	0,43
<i>Amphiroa fragilissima</i>	0,515	0,38	0,42	0,56	0,60	0,29	0,27	0,47	0,55	0,43	0,45	0,54	0,50
<i>Amphiroa rigida</i>	0,14	-0,04	0,00	0,26	0,17	0,10	0,41	0,42	0,32	0,22	0,12	0,22	0,13
<i>Amphiroa tribulus</i>	0,39	0,40	0,30	0,48	0,40	0,31	0,41	0,63	0,46	0,52	0,38	0,47	0,06
<i>Avrainvillea asarifolia</i>	0,60	0,42	0,45	0,57	0,54	0,10	0,48	0,47	0,47	0,31	0,48	0,65	0,27
<i>Avrainvillea rawsoni</i>	0,44	0,30	0,35	0,47	0,51	0,48	0,46	0,54	0,57	0,40	0,43	0,47	0,42
<i>Bostrychia montagnei</i>	0,35	0,39	0,40	0,35	0,37	0,53	0,49	0,35	0,38	0,37	0,46	0,35	0,14
<i>Caulerpa racemosa</i>	0,55	0,25	0,31	0,43	0,49	0,50	0,56	0,58	0,59	0,42	0,35	0,49	0,33
<i>Caulerpa sertularoides</i>	0,35	0,00	0,04	0,18	0,31	0,63	0,59	0,47	0,50	0,06	0,15	0,31	0,08
<i>Cladophoropsis membranaceae</i>	0,09	0,15	-0,14	0,08	0,16	0,40	0,10	0,23	0,27	0,32	0,10	0,15	0,19
<i>Colpomenia sinuosa</i>	0,31	0,52	0,46	0,35	0,37	0,59	0,39	0,35	0,38	0,32	0,43	0,35	0,19
<i>Dictyota bartayresiana</i>	0,08	0,24	-0,04	0,36	0,28	-0,08	-0,01	0,34	0,32	0,53	0,10	0,20	0,29
<i>Canistrocarpus cervicornis</i>	-0,36	-0,17	-0,16	-0,33	-0,31	0,40	0,21	0,03	-0,11	-0,16	0,2	0,22	0,37
<i>Halimeda discoidea</i>	0,44	0,30	0,35	0,47	0,51	0,48	0,46	0,54	0,57	0,40	0,43	0,47	0,46
<i>Halimeda incrassata</i>	0,18	0,00	0,23	0,03	0,12	0,03	0,05	0,16	0,14	0,30	0,00	0,04	0,05
<i>Halimeda opuntia</i>	-0,44	0,28	-0,19	-0,54	-0,48	0,12	-0,24	-0,36	-0,36	0,18	0,10	-0,37	0,41
<i>Halimeda tuna</i>	0,40	-0,01	0,01	0,11	0,27	-0,15	0,02	0,45	0,52	0,10	0,25	0,20	0,57
<i>Ganonema farinosum</i>	0,31	0,42	0,38	0,35	0,37	0,38	0,49	0,35	0,38	0,46	0,31	0,35	0,61
<i>Lobophora variegata</i>	0,06	0,16	-0,10	0,02	0,05	-0,07	-0,26	0,30	0,20	0,48	-0,04	0,06	0,34
<i>Laurencia obtusa</i>	0,16	0,41	0,36	0,17	0,21	0,62	0,39	0,17	0,21	0,20	0,40	0,17	0,31
<i>Palisada perforata</i>	0,35	0,39	0,40	0,35	0,37	0,53	0,49	0,35	0,38	0,37	0,46	0,35	0,52
<i>Mesophyllum mesomorphum</i>	0,60	0,42	0,45	0,57	0,54	0,10	0,48	0,47	0,47	0,31	0,48	0,65	0,52
<i>Neogoniolithon strictum</i>	0,26	0,54	0,26	0,35	0,37	0,42	0,26	0,35	0,38	0,59	0,26	0,35	
<i>Neomeris annulata</i>	0,44	0,30	0,35	0,47	0,51	0,48	0,46	0,54	0,57	0,40	0,43	0,47	
<i>Padina santae-crucis</i>	0,31	0,52	0,46	0,35	0,37	0,59	0,39	0,35	0,38	0,32	0,43	0,35	
<i>Riphilia tormentosa</i>	0,44	0,30	0,35	0,47	0,51	0,48	0,46	0,54	0,57	0,40	0,43	0,47	
<i>Ripocephalus phoenix</i>	0,45	0,15	0,17	0,40	0,32	0,46	0,65	0,61	0,43	0,37	0,24	0,55	
<i>Sargassum hystrix</i>	0,31	0,42	0,38	0,35	0,37	0,38	0,49	0,35	0,38	0,46	0,31	0,35	
<i>Sargassum vulgare</i>	0,51	0,34	0,54	0,58	0,59	0,53	0,39	0,48	0,48	0,37	0,35	0,53	
<i>Styopodium zonal</i>	0,24	0,04	0,33	0,31	0,35	0,30	0,21	0,09	0,26	0,00	0,13	0,17	
<i>Titanoderma prototypum</i>	0,15	0,00	-0,11	0,20	0,22	0,29	0,47	0,57	0,44	0,21	0,00	0,26	
<i>Turbinaria turbinata</i>	0,30	0,48	0,23	0,10	0,00	0,5	0,2	0,3	0,1	0,28	0,30	0,32	
<i>Udotea flabellum</i>	0,33	-0,27	-0,11	0,17	0,20	0,52	0,57	0,65	0,50	0,03	0,00	0,41	
<i>Udotea occidentalis</i>	0,35	0,23	0,17	0,44	0,38	0,30	0,38	0,65	0,52	0,45	0,34	0,42	
<i>Udotea wilsonii</i>	0,22	0,09	0,11	0,29	0,20	0,48	0,56	0,42	0,27	0,24	0,30	0,37	
<i>Valonia ventricosa</i>	0,15	0,15	0,10	0,26	0,17	0,32	0,57	0,38	0,22	0,33	0,13	0,34	

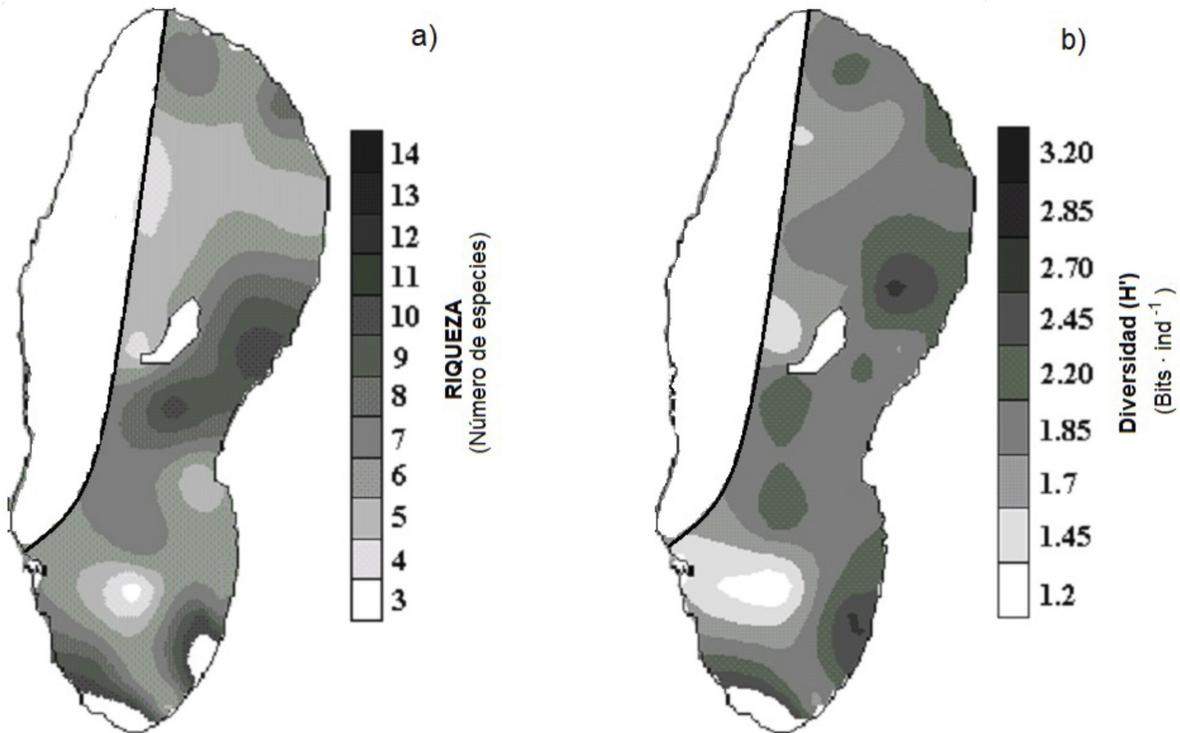


FIGURA 4. Patrón espacial de los descriptores comunitarios en la laguna arrecifal del Banco Chinchorro: a) Riqueza y b). Diversidad. / Spatial pattern of the community descriptors in the reef lagoon of Chinchorro Bank: a) Richness and b). Diversity.

La riqueza general de especies exhibe altos valores en la zona de barlovento y la parte central inferior de la laguna de arrecife, con zonas de alto valor en el sur (Fig. 4a). Para la diversidad de algas, el patrón general es similar al de la riqueza, con nodos de alta densidad en la zona de barlovento y valores más bajos en la porción central inferior del Banco (Fig. 4b).

DISCUSIÓN

Los resultados muestran que la flora marina en Banco Chinchorro es menos diversa en comparación con otras áreas protegidas en la misma región (Tabla 5). Esto puede deberse al método de muestreo, ya que en las otras áreas se tomó el dato de los programas de manejo que reportan una compilación de registros, tablas sin editar, observaciones y referencias desconocidas que a menudo se refieren a regiones y no a sitios específicos, con diferentes métodos de

colecta, diferentes tiempos y diferentes autores. No obstante, esta diferencia también puede deberse a que los organismos del arrecife, como los corales, están más desarrollados en esta área y, por lo tanto, ejercen una presión más competitiva con relación al espacio disponible, limitando a las macroalgas.

La mayor parte de la laguna Chinchorro Bank es una combinación de sustratos rocosos y arenosos, especialmente en las áreas de arrecifes poco profundos, lo que resulta en una amplia variedad de hábitats. En algunas áreas de los fototranssectos, el desarrollo de los corales hermatípicos fue extenso, particularmente en áreas de crestas y cañones (aproximadamente el 10 % del área cubierta a través de esta metodología). Las macroalgas más conspicuas fueron las rodófitas calcáreas incrustantes; no obstante que representaron el 5 % de la cobertura total. Gutiérrez-Carbonel *et al.* (1983) reportan una cobertura de macroalgas del 50-65 % en la Reserva de la Biosfera de Sian Ka'an, valores mayores a los encontrados en Banco Chinchorro.

Tabla 5. Comparación del número de especies de macroalgas en otras ANP de la región del Caribe Mexicano. / Algae richness comparison with other National Protected Area in the Mexican Caribbean Region.

Área Natural Protegida	Chlorophyta	Ochrophyta	Rodophyta	Totales	Fuentes
Isla Contoy	-	-	-	41	INE 1997
Costa Occidental de I. Mujeres, P. Cancún y P. Nizuc	86	44	124	264	INE 1998a
Sian Ka'an	66	19	86	171	INE 1996
Sian Ka'an	15	46	35	96	Keeney 1999
Cozumel	75	55	166	296	INE 1998b
Banco Chinchorro	59	22	53	135	INE 2000
Banco Chinchorro	19	11	18	38	Este trabajo

La distribución de macroalgas en los fondos de coral muestra que estas áreas están dominadas por Ochrophytas, como se ha informado en Jamaica (Andrés & Witman 1995), Panamá (Clifton *et al.* 1996) y otras partes del Caribe mexicano (Gutiérrez-Carbonel *et al.* 1993, Jordan *et al.* 1994, Keeney 1999, Cetz-Navarro *et al.* 2008, Pedroche & Senties 2020). Esta amplia distribución y alta abundancia de Ochrophyta, particularmente para el grupo Dictiotales, puede ser el resultado de su muy baja preferencia por los depredadores (Littler *et al.* 1983, Humphries *et al.* 2014), como producto de su capacidad para aumentar las defensas químicas en respuesta a la actividad herbívora. El predominio de las Rhodophytas (*Palisada perforata*) en la comunidad de fondo blando es posiblemente un efecto de las altas tasas de competencia en estos entornos, que es especialmente fuerte para las estructuras de fijación desarrolladas (González-Solis & Torruco 2015), lo cual no sucede en los substratos duros.

Varios autores han abordado los factores que controlan la abundancia de macroalgas en el Caribe (Litter *et al.* 1987, Sánchez-Molina *et al.* 2007, Ortégón-Aznar *et al.* 2009, Wilson *et al.* 2012, González-Solis *et al.* 2018). Los estudios y la observación en otros arrecifes sugieren que los arrecifes no tienen asociaciones interespecíficas estables que existan en un supuesto equilibrio, como se ha propuesto (Littler *et al.* 1993, Vilchis 2015). Esto es fuertemente corroborado con la flora marina del Banco Chinchorro.

Las relaciones de similitud exhiben una alta heterogeneidad de hábitats en la que la vinculación de diferentes estaciones en el norte con elementos en el centro puede resultar de las características de relleno de esta zona. Esto lo hace similar a las planicies arenosas en el área central de la laguna (González-Solis & Torruco 2015). Sin embargo, los fuertes conjuntos de estaciones que tipifican esta zona, particularmente en el área de sotavento, pueden deberse a la etapa de desarrollo de la vegetación sumergida en estas áreas. Es importante

tener en cuenta que, aunque el sistema de arrecifes es saludable, algunas de las asociaciones de paridad, en las que se observaron algunos impactos negativos, pueden provenir del uso de los cayos como bases para las cooperativas de pesca de caracol rosado y langosta; así como el uso turístico incontrolado.

A pesar de esto, los impactos ecológicos observados de estas actividades fueron mínimos, lo que significa que la mayoría de los patrones de distribución de macroalgas podrían atribuirse principalmente a los efectos de la variabilidad ambiental. Uno de ellos es el gradiente de profundidad sur-norte que varía desde profundidades superiores a 20 m en el sur hasta un promedio de 2 m en el norte. Las tendencias de la distribución pueden estar relacionadas con la disponibilidad de luz, la alta suspensión de sedimentos y su posterior sedimentación y que conllevan las corrientes locales y la especificidad del sustrato, ya que estos elementos son más significativos en estas comunidades (Mariño-Tapia *et al.* 2010, Astorga-Moar 2017, Platscheck *et al.* 2020).

El presente estudio, sin embargo, no incluye un examen detallado de estos factores, y el análisis directo de la densidad fitobentónica con la batimetría como causa directa de los patrones de distribución no proporciona una causalidad estadística adecuada. Sin embargo, la salinidad superficial parece tener la mayor influencia parcial en la distribución. Hay dos causas importantes que pueden conducir a salinidades más bajas en el centro de la laguna del Banco Chinchorro. El primero son los eventos meteorológicos que a menudo van acompañados de lluvias torrenciales, y el segundo es la presencia de agua menos salina en áreas cercanas a Cayo Centro donde la filtración causa el afloramiento del agua residente.

De acuerdo con los reportes de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA 2018), las condiciones de huracán también son bastante frecuentes en esta región. Esto

conduce a perturbaciones a gran escala en la distribución de algas, especialmente en lugares en el lado de barlovento de la laguna de arrecife. Los cambios sustanciales podrían ser efectos directos como la intensa acción de las olas (Mariño-Tapia *et al.* 2010) y efectos indirectos como un aumento en la suspensión de sedimentos que finalmente se asienta en la flora (Wilson *et al.* 2012, Bayraktarov *et al.* 2014). *Halimeda* tiene un sistema rizoidal y una morfología compacta que es ventajosa para resistir la intensa acción de las olas. En consecuencia, estas especies son más comunes en áreas con estas características (Mallela *et al.* 2010). El predominio de *Halimeda incrassata* en la zona norte apoya esto y su papel como ocupante del espacio ha sido bien documentado en los arrecifes de Jamaica (Liddell *et al.* 1988). Otras especies sobreviven a la abrasión de sedimentos en áreas de alta energía a través de su capacidad para colonizar hábitats crípticos.

Las perturbaciones catastróficas también conducen al movimiento de comunidades bentónicas y sedimentos (Wohlgemuth *et al.* 2017) que pueden causar la suspensión de grandes cantidades de nutrientes en el agua. En consecuencia, las algas hacen un uso intenso de estos y proliferan rápidamente (Torres-Alvarado & Calva-Benítez 2012). Por ejemplo, en las áreas alrededor de Cayo Centro se observan diferentes patrones de colonización después de tormentas tropicales de menor intensidad. En las áreas de fondo duro, no se producen masas flotantes de algas dictiotales, cladoforales y rodófitas filamentosas similares a las reportadas por Collado *et al.* (1993) y Baumann *et al.* (2019) en fondos blandos, producto de la acción de huracanes y tormentas tropicales a medida que ocurren durante esa temporada.

Esto implica que las macroalgas en Banco Chinchorro no parecen verse afectadas por los mismos factores que en otros atolones del Caribe. Díaz-Pulido & Díaz (1997) en cuatro atolones frente a la costa de Colombia y Sánchez *et al.* (2005) y en tres atolones frente a Nicaragua, mencionan que la asociación de especies podría estar relacionada con la profundidad, la exposición a las olas y la presión de pastoreo de los peces. Estos sitios también tuvieron alta abundancia de *Laurencia* en zonas poco profundas y alta abundancia de *Lobophora variegata* en zonas profundas, como se observó en Banco Chinchorro. Con los resultados actuales, sin embargo, ninguno de estos tres elementos parece ser importante en la distribución de algas. A diferencia de otros arrecifes (Baumann *et al.* 2019), la laguna de Banco Chinchorro exhibe una marcada correspondencia entre la zonificación de corales y la zonificación de algas, a pesar de su desarrollo paralelo.

El análisis multivariado identificó diferencias cuantitativas en las diferentes zonas de arrecifes y mostró la importancia de los atributos ambientales en la distribución de algas.

Sin embargo, los factores que causan estos patrones de distribución no se identificaron claramente, ya que el análisis sugiere que ocurren cambios significativos que no son atribuibles a estos patrones. Esto está respaldado por los bajos coeficientes de correlación que muestran que diferentes partes de la misma zona lagunar pueden estar sujetas a diferentes presiones, o combinaciones de estas, en el proceso de selección. Esto es cierto incluso en áreas que están fisiográficamente relacionadas por la frecuencia e intensidad de la perturbación del oleaje y que tienen valores similares de profundidad, temperatura, salinidad y oxígeno disuelto.

Una observación particularmente interesante fueron los parches espaciales de múltiples especies de algas que formaron parte de una disminución progresiva de la cobertura de algas hacia las islas. Las fluctuaciones en la disponibilidad de nutrientes, dada la naturaleza kárstica de la península puede originar este fenómeno (Torres-Alvarado & Calva-Benítez 2012, Rädcker *et al.* 2015). Esto ocasionaría surgencias locales con una marcada influencia en aguas poco profundas y proporcionan ambientes para el crecimiento de la flora bentónica. Los cambios en la salinidad superficial que se presentan pueden ser la manifestación de estos cambios en los nutrientes, lo que significa que pueden desempeñar un papel determinante en la distribución espacial de las macroalgas y de ahí su correspondencia.

La distribución de macroalgas en los arrecifes de coral generalmente no está controlada solo por factores ambientales, también puede verse afectada por la competencia por el espacio, la luz y otros componentes del ecosistema arrecifal (UNEP 2006). Sin embargo, la importancia relativa de los determinantes bióticos y físicos en la estructura de la comunidad de algas bentónicas es evidente. Otro factor que considerar es que muchas algas tienen un comportamiento exclusivamente estacional de crecimiento y reproducción, lo que podría afectar los resultados del estudio (Collado & González 1993, Príncipe *et al.* 2021).

No se registró evidencia sólida de pastoreo intenso de herbívoros (peces, equinodermos y otros invertebrados) en las áreas de substrato duro, como en las áreas de fondo blando con la alta abundancia de *Aliger gigas* (Linnaeus, 1758), que está ejerciendo presión de pastoreo y cuya influencia no debe descartarse. *Lobophora variegata* era abundante en áreas más profundas, ocupando áreas inicialmente cubiertas por coral vivo (Jordan & Martín 1987), pero sin un gradiente de cambio hacia fondos dominados por corales a un sistema dominado por algas. Tampoco hubo evidencia de áreas en estado de transición de algas carnosas a incrustantes, como lo informaron Díaz-Pulido & Díaz (1997) y Sánchez *et al.* (2005) para los atolones en Colombia. Sin embargo, se

observó una distribución circular cerca de Isla Lobos, la isla más pequeña en la parte sur del arrecife, que puede resultar tanto de la escasa protección proporcionada por la isla como del descascarillado de *Aliger gigas* y los desechos de fileteado de peces que contaminan las áreas poco profundas cercanas a la isla.

Los patrones generales de riqueza y diversidad de especies exhiben un área de bajo valor a la mitad de la parte sur del Banco, que tiene el mayor desarrollo de otras comunidades arrecifales, como los corales. Sotavento no es muy diverso y es pobre en especies, una disminución posiblemente causada por la alta dinámica de sedimentos en esta área (Flores-Leiva *et al.* 2010, Botello *et al.* 2022, EPA 2022). Dada la importancia potencial de estos factores en los patrones generales, este tipo de estudio debe llevarse a cabo con el mayor número posible de grupos de arrecifes y utilizando un modelo de Kriging bayesiano para determinar la probabilidad estimada de cambio y, en consecuencia, identificar zonas de alto riesgo o que requieren protección especial o restauración inmediata. Este estudio puede servir de inicio para este tipo de investigación y ser una base para futuros estudios.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por los apoyos otorgados en varios proyectos; también se agradece a los pescadores de Banco Chinchorro por la ayuda prestada en el campo.

REFERENCIAS

- Aguilera-Pérez, A.E., de la Cruz-Francisco, V. 2017. Composición taxonómica de las algas césped y su macrofauna asociada, Arrecife Tuxpan, Sistema Arrecifal Lobos-Tuxpan. Boletín del Instituto Ocenográfico de Venezuela 56(2): 66-80.
- Alcolado, P.M., Morgan, I.E., Kramer, P.A., Ginsburg, R.N., Blanchon, P., de la Guardia, E., Kosminin, V., González-Ferrer, S., Hernández, M. 2010. Conditions of remote reefs off southwest Cuba. Ciencias Marinas 36(2): 179-197.
- Andres, N.G., Witman, J.D. 1995. Trends in community structure on a Jamaican reef. Marine Ecology Progress Series 118: 303-310.
- Astorga-Moar, A. 2017. Variación en la dinámica litoral bajo escenarios predictivos de degradación de arrecifes. Tesis MC. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Baumann, J.H., Ries, J.B., Rippe, J.P., Courtney, T.A., Aichelman, H.E., Westfield, I., Castillo, K.D. 2019. Nearshore coral growth declining on the Mesoamerican Barrier Reef System. Global Change Biology 25: 3932-3945. <https://dx.doi.org/10.1111/gcb.14784>
- Bayraktarov, E., Bastidas-Salamanca, M., Wild, C. 2014. The physical environment in coral reefs of the Tayrona national natural park (Colombian Caribbean) in response to seasonal upwelling. Boletín de Investigaciones Marinas Costeras 43(1): 137-156.
- Berner, T. 1990. Coral reef algae. In: Dubinsky, Z. (Ed.) Ecosystems of the World 25, pp. 253-264. Coral Reefs, Elsevier, New York.
- Botello-López, F.J., Vázquez-Camacho, C., Mayani-Parás, F., Vega-Orihuela, M.E., Morales-Díaz, S.P. 2022. Protocolo para el monitoreo ecosistémico de arrecifes de coral en áreas naturales protegidas. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza, Conservación Biológica y Desarrollo Social. A.C.
- Cetz-Navarro, N.P., Espinoza-Ávalos, J., Senties-Granados, A., Quan-Young, L.I. 2008. Nuevos registros de macroalgas para el Atlántico mexicano y riqueza florística del Caribe Mexicano. Hidrobiológica 18(1): 11-19.
- Clifton, K.E., Kim, K., Wulff, J.L. 1997. A field guide to the reefs of caribbean Panama with an emphasis on western San Blas. Proceeding 8th International Coral Reef Symposium 1: 167-184. Panamá.
- Collado, L., González, J. 1993. Macroalgas del sistema Lagunar de Nichupté Quintana Roo. In: S. I. Salazar and N.E. González (eds). Biodiversidad marina y costera de México, pp. 752-760. CONABIO y CIQRO, México.
- Collado, L., González, J., Ezcurra, E. 1999. Patrones de distribución ficológica en el sistema laguna de Nichupté, Quintana Roo, México. Acta Botánica Mexicana 31: 19-32.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2018. Reporte del clima en México. Servicio meteorológico nacional. Gerencia meteorológica y climatológica. Subgerencia de pronóstico.
- De La Lanza, G.E., Tovilla, C. 1986. Una revisión sobre taxonomía y distribución de pastos marinos. Universidad y Ciencia 3(6): 17-38.
- Díaz-Pulido, G., Díaz, J.M. 1997. Algal assemblages in lagoonal reefs of caribbean oceanic atoll. Proceeding 8th International Coral Reef Symposium 1: 827-832. Panamá.
- Díaz-Ruiz, M.C., Vroom, P.S., Tsuda, T.R. 2018. Marine benthic macroalgae of a small uninhabited south Pacific atoll (Rose Atoll, American Samoa). Atoll Research Bulletin 616: 1-12.
- EPA. 2022. Amenazas para los arrecifes de coral. Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos.
- Flores-Leiva, L., Rangel-Campo, A., Díaz-Ruiz, M., Venera-Pontón, D.E., Díaz-Pulido G. 2010. Efecto de la sedimentación en el reclutamiento de las macroalgas *Dictyota* spp. y *Lobophora variegata*: Un estudio experimental en el parque nacional natural Tayrona, Caribe Colombiano. Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras 39(1): 41-56.
- Fonseca A.C., Villaca R.C., Knoppers, B.A. 2018. Nutrients and macroalgal primary production on the Sole Atoll in the SW-Atlantic (Atol das Rocas, Brazil). <https://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.10403.09766>
- Garduño-Solórzano, G., Godínez-Ortega, J.L., Ortega, M.M. 2005.

- Distribución geográfica y afinidad por el substrato de las algas verdes (Chlorophyceae) bénticas de las costas mexicanas del Golfo de México y Mar Caribe. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 76: 61-78.
- Gómez-Cubillos, C., Licero, L., Perdomo, L., Rodríguez, A., Romero, D., Ballesteros-Contreras, D., Gómez-López, D., Melo, A., Chasqui, L., Ocampo, M.A., Alonso, D., García, J., Peña, C., Bastidas, M., Ricaurte, C. 2015. Portafolio "Áreas de arrecifes de coral, pastos marinos, playas de arena y manglares con potencial de restauración en Colombia". Serie de Publicaciones Generales del Invemar No. 79, Santa Marta. 69 pp.
- Gómez-Márquez, J. 2023. A new definition and three categories for classifying ecosystems. *Academia Biology I*. <https://doi.org/10.20935/AcadBiol6072>
- González-Gandara, C., Cruz-Arellano, M., Domínguez-Barradas, C., Serrano-Solis, A., Basañez-Muñoz A.J. 2007. Macroalgas asociadas a cuatro hábitats del arrecife Tuxpan, Veracruz, México. *UDO Agrícola* 7(1): 253-257.
- González-Solis, M.A., Torruco, D. 2015. Distribución de las macroalgas en la laguna arrecifal de Banco Chinchorro: Arrecife coralino del Caribe mexicano. *Gayana Botánica* 72(1): 120-130.
- González-Solis, M.A., Torruco, D., Torruco-González, A.D. 2018. Biodiversidad de macroalgas en arrecifes coralinos de la Sonda de Campeche, el Caribe mexicano y Belice. *Gayana Botánica* 75(1): 501-511.
- Gutierrez-Carbonel, D. M., Pérez, M., Padilla, C., Pizana, J., García, G., Loreto, R. M., Camarena, T. 1995. Caracterización de los arrecifes coralinos de la reserva de la biósfera Sian Ka'an, Q. Roo. In: Creel, J.B. (Ed.) *Sian Ka'an serie documentos No. 1. Amigos de Sian Ka'an, A.C.*, pp. 1-47.
- Gutiérrez-López, A., Ramírez, A.I., Lebel, T., Santillán, O. 2011. El variograma y el correlograma, dos estimadores de la variabilidad de las mediciones hidrológicas. *Revista de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquía* 59: 193-202.
- Hall, L.M., Morris, L.J., Chamberlain, R.H., Hanisak, M.D., Virnstein, R.W., Paperno, R., Riegl, B., Ellis, L.R., Simpson, A., Jacoby, Ch.A. 2022. Spatiotemporal patterns in the biomass of drift macroalgae in the Indian River Lagoon, Florida, United States. *Frontier in Marine Science*. <https://dx.doi.org/10.3389/fmars.2022.767440>
- Henríquez, C., Méndez, J.C., Másis, R. 2013. Interpolación de variables de fertilidad del suelo mediante el análisis Kriging y su validación. *Agronomía Costarricense* 37(2): 71-82.
- Humpries, A.T., McClanahan, T.R., McQuaid, C.D. 2014. Differential impacts of coral reef herbivores on algal succession in Kenya. *Marine Ecology Progress Series* 504: 119-132. <https://dx.doi.org/10.3354/meps10744>
- INE (Instituto Nacional de Ecología). 1996. Programa de Manejo Reserva de la Biosfera de Sian Ka'an. INE/SEMARNAP. Programas de Manejo 3, Áreas Naturales Protegidas, México. 75 pp.
- INE (Instituto Nacional de Ecología). 1997. Programa de Manejo del Parque Nacional Isla Contoy. México. INE/SEMARNAP, México. 123 pp.
- INE (Instituto Nacional de Ecología). 1998a. Programa de Manejo Parque Marino Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc. INE/SEMARNAP, México. 159 pp.
- INE (Instituto Nacional de Ecología). 1998b. Programa de Manejo Parque Marino Nacional Arrecifes de Cozumel. INE/SEMARNAP, México. 164 pp.
- INE (Instituto Nacional de Ecología). 2000. Programa de manejo de la Reserva de la Biosfera de Banco Chinchorro. INE/SEMARNAP, México. 210 pp.
- Jordán, E., Martín, E. 1987. Chinchorro: morphology and composition of a Caribbean atoll. *Atoll Research Bulletin* 310: 1-33.
- Jordán., E. Martín, M. Sánchez y A. González. 1994. The Sian Ka'an Biosphere Reserve Coral Reef System, Yucatán Península, México. *Atoll Research Bulletin* 423: 1-19.
- Keeney, T.S. 1999. Coral Reef macroalgae in northern Sian Ka'an Biosphere Reserve, Quintana Roo, México. M.S. Thesis. Biology Program, Texas A & M University-Corpus Christi, Corpus Christi, Texas. 58 pp.
- Lapointe, B.E., Dawes, C.J., Tenore, K.R. 1984. Interactions between light and temperture on the physiological ecology of *Gracilaria tikvahiae* (Gigartinales: Rhodophyta). II. Nitrate uptake and levels of pigments and chemical constituents. *Marine Biology* 80: 171-178.
- León-Álvarez, D., Candelaria-Silva, C.F., Hernández-Almaráz, P., León-Tejera, H. 2017. Géneros de algas marinas tropicales de México: I. Algas Verdes. Universidad Nacional Autónoma de México.
- León-Álvarez, D., López-Gómez, N.A., Ponce-Márquez, M.E., Núñez-Resendiz, M.L., Candelaria-Silva, C., Cruz-Rodríguez, A., Rodríguez-Vargas, D. 2019. Géneros de algas marinas tropicales de México: II. Algas rojas. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Liddell, W.D., Ohlhorst, S.L., Boss, S.K. 1988. The significance of Halimeda as a spaceoccupier and sediment producer 1-750 m, North Jamaica. *Procc. 6th Coral Reef Sym. Australia*.
- Littler, M.M., Littler, D.S. 2013. The nature of crustose coralline algae and their interactions on reefs. *Smithsonian Contribution to the Marine Science* 19: 199-212.
- Littler, M.M., Littler, D.S., Taylor, R. 1983. Evolutionary strategies in a tropical barrier reef system: functional-form groups of marine macroalgae, Cambridge University Press, New York, pp 161-175.
- Ludwing, J.A., Reynolds, J.F. 1990. *Statistical ecology*. John Wiley and sons.
- Luna-Ortega, I., de la Cruz-Francisco, V. 2017. Ensambls de macroalgas sobre superficies muertas de corales escleratinios (Anthozoa: Scleratinian) en el arrecife Oro Verde, Veracruz, México. *Oceánides* 32(1): 11-23.

- Magurran, A.E. 1988 *Ecological diversity and its measurement*. Croom Helm Limited, London.
- Mallela, J., Parkinson, R., Day, O. 2010. An assessment of coral reefs in Tobago. *Caribbean Journal of Science* 46(1): 83-87.
- Mariño-Tapia, I., Silva-Casarín, R., Enriquez-Ortiz, C., Mendoza-Baldwin, E., Escalante-Mancera, E. Ruiz-Rentería, F. 2010. Wave transformation and wave-driven circulation on natural reefs under extreme hurricane conditions. *Coastal Engineering*. <https://dx.doi.org/10.9753/icce.v32.waves.28>
- Mateo-Cid, L.E., Mendoza-González, C.A., Ávila-Ortiz, A.G., Díaz, M. 2013. Algas marinas bentónicas del litoral de Campeche, México. *Acta Botánica Mexicana* 104: 53-92.
- Mateo-Cid, L.E., Mendoza-González, C.A., Searles, R.B. 2003. A Checklist and Seasonal Account of the Deepwater Rhodophyta around Cozumel Island on the Caribbean Coast of Mexico. *Caribbean Journal of Science* 42(1) 39-52.
- Orlóci, L. 1978. *Multivariate analysis in vegetation research*. Sec. Ed. Dr. W.J.Junk Publ. The Hague, The Netherlands.
- Ortega, M., Godínez-Ortega, J., Garduño, G. 2001. Catálogo de algas bénticas de las costas mexicanas del Golfo de México y Mar Caribe. Cuadernos del IBUNAM 34. CONABIO.
- Ortegón-Aznar, I., Sánchez-Medina, I., Casanova-Cetz, R.H. 2009. The distribution of maine algae in a coastal lagoon, northern Yucatan Peninsula, Mexico. *Neotropical Biology and Conservation* 4(2): 98-105.
- Pedroche, F.F., Senties, A. 2020. Diversidad de macroalgas marinas en México. Una actualización florística y nomenclatural. *Cymbella* 6(1): 4-10.
- Pielou, E.C. 1984. *The interpretation of ecological data. A premier on classifications and ordination*. Wiley-Interscience Publ. New York.
- Pitman, S.J., Bauer L., Hile, S.D., Jeffrey, C.F.G., Davenport, E., Caldwell, C. 2014. *Marine protected areas of the U.S. Virgin Islands: Ecological performance report*. NOAA Technical memorandum NOS NCCOS 187. Silver Spring, MD. 89 pp.
- Platscheck, Ch., Gansfort, B., Majdi, N., Traunspurger, W. The influence of environmental and spatial factor son benthic invertebrate metacommunities differing in size and dispersal mode. *Aquatic Ecology* 54: 447-461. <https://doi.org/10.1007/s10452-020-09752-2>
- Porras-Velázquez, A. 2017. *Método Kriging de inferencia espacial*. Centro Geo-CONACYT, Centro de Investigación en Geografía y Geomática "Ing. Jorge L. Tamayo", A.C.
- Principe S.C., Acosta, A.L., Andrade, J.E., Lotufo, T.M.C. 2021. Predicted shifts in the distributions of Atlantic reef-building corals in the fase of climate change. *Frontiers in Marine Science* 8: 673086. <https://dx.doi.org/10.3389/fmars.2021.673086>
- Rädecker, N., Pogoreutz, C., Voolstra CVh, R., Wiedenmann, J., Wild, Ch. 2015. Nitrogen cycling in corals: the key to understanding holobiont functioning? *Trends in Microbiology* 23(8): 490-497.
- Sánchez, J.A., Pizarro, V., Acosta-de Sánchez, A.R., Castillo, P.A., Herron, P., Martínez, J.C., Montoya, P., Orozco, C. 2005. Evaluating coral reef benthic communities in remote Caribbean Atolls (Quitassueño, Serrana, and Roncador Banks) to recommend marine-protected areas for the seaflowe biosphere reserve. *Atoll Research Bulletin* 531.
- Sánchez-Molina, I., González-Ceballos, J., Zedrina-Moguel, C., Casanova-Cetz, R. 2007. Análisis de la biodiversidad de algas marinas entre Uaymitún y Chuburná, Yucatán. *Ingeniería* 11(1): 43-51.
- Suchley, A., McField, M.D., Álvarez-Filip, L. 2016. Rapidly increasing macroalgal cover not related to herbivorous fishes on Mesoamerican reefs. *Peerj* 4: e2084. <https://dx.doi.org/10.7717/peerj.2084>
- Su-Jin, H., Jae-Gil, J., Hyun-Jung, K., Tae-Ho, S., Joo-Myun, P. 2023. Ecological evaluation macroalgal communities of five islands of Korea in the Yellow Sea. *Acta Oceanologica Sinica* 42(6): 49-56.
- Torres-Alvarado, M.R., Calva-Benítez, L.G. 2012. Nutrientes en arrecifes de coral. Un caso de estudio. *ContactoS* 85: 42-50.
- Torrucó, D. 1995. *Ecología y Faunística de los corales escleractinios en los arrecifes de coral del sureste de México*. Thesis Phd. Universidad de Barcelona, España.
- Torrucó, D., González, A., Ordaz, J. 2003. The role of environmental variables in the lagoon coral community structure on the Chinchorro Bank, México. *Bulletin of Marine Science* 73(1): 23-36.
- UNEP. 2006. Isaza, C.F.A., Sierra-Correa, P.C., Bernal-Velasquez, M., Londoño, L.M. and W. Troncoso. *Caribbean Sea/ Colombia & Venezuela, Caribbean Sea/Central America & Mexico, GIWA Regional assessment 3b, 3c*. University of Kalmar, Kalmar, Sweden.
- Vilchis A., M. I. 2015. *Biogeografía de las grandes macroalgas en el Golfo de México y Caribe Mexicano*. Tesis de maestría. Universidad Autónoma Metropolitana. 105 pp.
- Wilson, S.K., Graham, N.A.J., Fisher, R., Robinson, J., Nash, K., Chong-Seng, K., Polunin, N.C.V., Aumeeruddy, R., Quatre, R. 2012. Effect of the macroalgal expansion and marine protected areas on coral recovery following a climatic disturbance. *Conservation Biology* 26: 995-1004. <https://dx.doi.org/10.1111/j.1523-1739.2012.01926.x>
- Wohlgemuth, D., Solan, M., Godbold, J.A. 2017. Species contributions to ecosystem process and function can be population dependent and modified by biotic and abiotic setting. *Proceeding Real Society. B* 284: 20162805. <https://dx.doi.org/10.1098/rspb.2016.2805>

Received: 14.04.23

Accepted: 02.11.23

Editor: Alfredo Saldaña