

Efecto de las condiciones lumínicas ambientales en el crecimiento del coral *Orbicella faveolata* en el Caribe mexicano

Yasmin Lorenzo-Jiménez¹, Gabriela Gutiérrez-Estrada^{2,3}, Juan P Carricart-Ganivet², JJ Adolfo Tortolero-Langarica^{1,2*}

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Historial del artículo:

Recibido 06 de junio de 2024

Aceptado 19 de septiembre de 2024

Publicado 30 de octubre de 2024

READ IN ENGLISH:

<https://doi.org/10.7773/cm.v2024.3497>

AUTOR DE CORRESPONDENCIA

* E-mail: adolfo.tl@bahia.tecnm.mx

¹ Tecnológico Nacional de México/IT Bahía de Banderas, 63734 Bahía de Banderas, Nayarit, México.

² Laboratorio de Esclerocronología de Corales Arrecifales, Unidad Académica de Sistemas Arrecifales, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Autónoma de México, 77580 Puerto Morelos, Quintana Roo, México.

³ Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México, 04510 Coyoacán, Ciudad de México, México.

RESUMEN. Los corales masivos del género *Orbicella* son organismos clave que ayudan a mantener la estructura física de los arrecifes de coral del Caribe. Sin embargo, estos arrecifes están actualmente amenazados por los cambios ambientales, como el aumento de nutrientes y la contaminación, los cuales afectan las características ópticas del agua de mar y, en consecuencia, limitan su desarrollo. Por lo tanto, analizar la respuesta de las especies de coral en relación a su crecimiento ante cambios en los ambientes lumínicos nos puede ayudar a mejorar las estrategias de mitigación y conservación para los arrecifes de coral. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto del cambio en las condiciones lumínicas ambientales sobre la tasa de crecimiento de *Orbicella faveolata* mediante la comparación de fragmentos trasplantados de 9 m a 3 m de profundidad y fragmentos de control que se trasplantaron bajo la misma condición lumínica (3 m). Los fragmentos en ambos tratamientos mostraron crecimiento similar (16-23%), así como valores comparables de la extensión y del diámetro. La tasa de crecimiento anual para los fragmentos control y los fragmentos del tratamiento de trasplante fue de $1.04 \pm 0.18 \text{ cm}\cdot\text{año}^{-1}$ y $1.11 \pm 0.23 \text{ cm}\cdot\text{año}^{-1}$, respectivamente. Los resultados de este estudio revelan que *O. faveolata* puede aclimatarse fisiológicamente a nuevas condiciones lumínicas ambientales tras ser trasplantado desde un ambiente profundo a uno somero en un periodo corto (1-9 meses). Esto sugiere un gran potencial para el uso de *O. faveolata* en estrategias de restauración y programas de manejo que pretenden mantener las poblaciones y la estructura física de los arrecifes de coral en la región del Caribe.

Palabras clave: fragmentos de coral, arrecife de coral, trasplante de corales, corales masivos, crecimiento esqueletal.

INTRODUCCIÓN

Los arrecifes coralinos son de los ecosistemas más complejos y diversos del planeta y se caracterizan por ser sitios de alimentación, reproducción y refugio, ya que albergan aproximadamente el 25% del total de las especies marinas (Sheppard et al. 2009, Veron 2010). Los arrecifes de coral son estructuras bentónicas marinas formadas por la acumulación de carbonato de calcio (CaCO_3) biogénico secretado por organismos calcificadores, como los corales hermatípicos, los moluscos y las algas coralinas (Sheppard et al. 2009). Los corales hermatípicos desempeñan un papel clave como productores primarios en la construcción de estas estructuras físicas; en condiciones óptimas, pueden generar

hasta $10 \text{ kg de CaCO}_3\cdot\text{m}^3\cdot\text{año}^{-1}$ (Chave et al. 1972, Kleypas et al. 1999). Los corales hermatípicos no solo incrementan la tridimensionalidad y complejidad del hábitat, sino que también juegan un papel fundamental en el mantenimiento del balance de diversas funciones biogeoquímicas y servicios ecosistémicos (Perry y Alvarez-Filip 2018).

Los corales hermatípicos tienen la capacidad de formar exoesqueletos a partir de la precipitación de CaCO_3 en forma de cristales de aragonita; este proceso es controlado por factores intrínsecos, como la variación genotípica, la comunidad simbiótica, la morfología y el sexo de los corales, así como factores extrínsecos, como la temperatura, la química del agua de mar y el ambiente lumínico (Foster et al. 1979, Todd 2008, Allemand et al. 2011). La tasa de crecimiento de

Acceso abierto

En línea ISSN: 2395-9053

Verificado con Similarity Check impulsado por iThenticate

<https://doi.org/10.7773/cm.v2025.3497>



Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), que permite compartir y adaptar el trabajo, siempre y cuando se dé el crédito apropiado a los autores originales y la fuente, proporcione un enlace a la licencia Creative Commons e indique si se realizaron cambios. Las figuras, tablas y otros elementos del artículo están incluidos en la licencia CC BY 4.0 del artículo, a menos que se indique lo contrario. Debe solicitar permiso al titular de los derechos de autor para utilizar material no cubierto por esta licencia. El título de la revista está protegido por derechos de autor propiedad de la Universidad Autónoma de Baja California, y el título y el logotipo de la revista no están sujetos a esta licencia.

los corales depende de la calcificación de carbonato, la cual requiere recursos energéticos derivados de la fotosíntesis que son translocados por los simbioses (Colombo-Pallota et al. 2010).

Tanto el simbiote como el hospedero presentan una plasticidad fenotípica destacada que les permite desarrollarse en distintos ambientes lumínicos e hidrodinámicos (Kaniewska et al. 2011). La arquitectura esquelética que construye cada pólipo juega un papel importante en el ambiente lumínico interno; las propiedades ópticas (reflectivas) del esqueleto provocan la dispersión múltiple de la luz, favoreciendo la fotosíntesis de las algas simbioses (Enríquez et al. 2017). Por lo tanto, el papel de la comunidad simbiótica en la traslocación de energía al coral para la producción de CaCO_3 y la construcción de su esqueleto es de gran relevancia (Enríquez et al. 2005, 2017; Colombo-Pallotta et al. 2010; Scheufen et al. 2017).

Desde este punto, las propiedades de absorción y reflexión de los esqueletos de los corales hermatípicos dependen del arreglo estructural que conforma su arquitectura interna, lo cual modula la dispersión de luz e influye en la cantidad de energía disponible para los procesos metabólicos del hospedero (Enríquez et al. 2017). Por lo tanto, dependiendo de las condiciones lumínicas, los corales pueden presentar distintas morfologías a nivel de coralito y a nivel de colonia (Graus y Macintyre 1976, 1982; Klaus et al. 2007). En condiciones de baja disponibilidad de luz (>20 m) las morfologías de los corales son generalmente planares con el fin de captar la mayor cantidad de luz, mientras que en condiciones de mayor disponibilidad de luz (1-5 m), las morfologías de los corales son más complejas (e.g., columnares o hemisféricas) y las colonias emplean la autosombra para evitar el exceso de luz (Kramer et al. 2021).

Orbicella es uno de los géneros de corales hermatípicos más importantes en la región del Caribe y uno de los más amenazados por los cambios ambientales, como la contaminación o el incremento de los nutrientes en el agua de mar debido a la descarga de aguas residuales (Rico-Ensenaro et al. 2023). Las especies del género *Orbicella* obtienen energía a partir de la asimilación heterotrófica (15-35%), la alimentación de zooplancton y la asimilación autotrófica (70-90%) mediante la translocación de los nutrientes provenientes de las algas endosimbióticas (Houlbrèque y Ferrier-Pagès 2009, Yranzo et al. 2020). Los productos fotosintéticos del simbiote son los que mayormente aportan al balance energético necesario para la supervivencia y el crecimiento las colonias de *Orbicella* (Teece et al. 2011). Sin embargo, ante cambios en la calidad del agua de mar (e.g., cambios en las propiedades ópticas o químicas), es importante entender el efecto que tiene el ambiente lumínico en la capacidad fenotípica de los corales para aclimatarse a diferentes gradientes ambientales y en su crecimiento (Merks et al. 2004).

Pese al importante efecto que tiene la luz sobre la morfología y plasticidad fenotípica de los corales, hay poca información sobre los mecanismos de crecimiento asociados a

cambios en las condiciones lumínicas (Todd 2008). En particular, el efecto de los cambios en las condiciones lumínicas sobre el crecimiento de los corales ha sido poco explorado. Desde este punto, se cree que *Orbicella faveolata* tiene un gran potencial para aclimatarse fisiológicamente a nuevos ambientes lumínicos debido a que se distribuye a un amplio gradiente de profundidad (1-50 m). Por lo que, el objetivo del presente estudio fue evaluar la respuesta en el crecimiento de colonias de *O. faveolata* trasplantadas entre hábitats lumínicos diferentes (i.e., de un ambiente profundo a uno somero) y analizar su capacidad de aclimatación, así como su uso potencial en intervenciones de restauración.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se realizó en el arrecife Jardines del Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos (PNAPM). Esta área natural protegida se estableció en 1998 y se encuentra frente al poblado de Puerto Morelos en el estado de Quintana Roo ($21^{\circ}00'00''$ a $20^{\circ}48'33''$ N, $86^{\circ}53'14.94''$ a $86^{\circ}46'38.94''$ O) (Fig. 1). El arrecife de Puerto Morelos es un arrecife costero tipo franja que forma una laguna interna, con una profundidad de 3-5 m, caracterizada por arena calcárea estabilizada por praderas de pastos marinos (CONANP 2000). El área tiene un arrecife posterior y una cresta arrecifal bien desarrollados, un arrecife frontal relativamente plano con algunas secciones de macizos y varios canales que descienden gradualmente a 20-25 m de profundidad hacia una extensa plataforma de arena (Rodríguez-Martínez et al. 2010). La zona arrecifal está compuesta por 41 especies de corales escleractíneos y 32 corales gorgonáceos. Las especies de corales hermatípicos más abundantes en la región son *O. faveolata*, *Orbicella annularis*, *Acropora palmata*, *Acropora cervicorni*, *Millepora complanata*, *Pseudodiploria strigosa*, *Montastraea cavernosa*, *Dichocoenia stokesii* y *Agaricia tenuifolia* (Ruíz-Rentería et al. 1998, Alvarez-Filip et al. 2019, Caballero-Aragón 2020, Molina-Ramos 2020). Sin embargo, en los últimos 5 años, la cobertura de coral vivo se ha reducido ($>60\%$) debido a efectos de anomalías térmicas, huracanes y enfermedades que ocasionan cambios en la composición y dominancia de especies (Alvarez-Filip et al. 2022).

Obtención de los parámetros de crecimiento

Se obtuvieron 16 fragmentos de *O. faveolata* a partir de 4 colonias adultas donantes de talla similar (hemisféricas de 40 cm de alto) y con apariencia saludable que se encontraban en el mismo gradiente lumínico (9 m) para el tratamiento de trasplante. El mismo procedimiento se llevó a cabo a un gradiente lumínico de 3 m de profundidad para el tratamiento de control. Todos los fragmentos (3 cm^2) fueron extraídos utilizando un taladro eléctrico hidráulico sumergible (Nemo Power Tools,

Hong Kong, China). Los fragmentos obtenidos a 9 m (tratamiento de trasplante) fueron traslocados a la profundidad de los fragmentos del tratamiento de control (3 m); se instalaron todos los fragmentos sobre 2 camas de fibra de vidrio. Se fijó cada fragmento a una placa de acrílico usando plastilina epóxica. Posterior a la instalación, se dejaron aclimatar los fragmentos durante 2 meses para disminuir el efecto de estrés por manipulación (Fig. 2).

Al finalizar el periodo de aclimatación, las siguientes variables se midieron mensualmente durante 9 meses en cada fragmento: extensión lineal (cm), definido como la distancia longitudinal desde la base del acrílico a la altura máxima de un fragmento; diámetro apical (cm), definido como el diámetro máximo de un fragmento desde una perspectiva aérea. Todas las mediciones fueron estimadas a partir de imágenes digitales (25 MP) obtenidas con una cámara GoPro Hero 9 (San Mateo, EE. UU.) (en función lineal) usando un vernier de plástico (precisión 0.05 cm) como escala de referencia. Las imágenes resultantes de cada muestreo mensual fueron procesadas para cada fragmento en los 2 tratamientos utilizando el programa ImageJ (Schneider et al. 2012).

Las variables ambientales que se tomaron en cuenta para este estudio fueron la temperatura del agua de mar ($^{\circ}\text{C}$) y la radiación fotosintéticamente activa (RFA), con la finalidad de describir su influencia en el crecimiento del coral masivo *O. faveolata*. Se obtuvieron valores diarios (mayo de 2021 a febrero de 2022) para ambas variables a partir de la base de datos del Sistema Académico de Monitoreo Meteorológico y Oceanográfico (SAMMO 2002), los cuales se promediaron para obtener un valor mensual para cada variable.

Análisis estadísticos

Se calcularon los parámetros estadísticos mensuales (i.e., el promedio, la desviación estándar, los rangos y los valores máximos y mínimos) para todas las variables de crecimiento. La tasa anual de crecimiento fue obtenida mediante la extrapolación de los datos de los 9 meses de estudio, tomando el valor medio de cada mes para no sobreestimar el crecimiento. Se obtuvo un valor mensual general, el cual fue agregado a cada uno de los 3 meses faltantes para completar el periodo anual. Posterior a probar la normalidad y homocedasticidad de los datos, se realizó un análisis de varianza

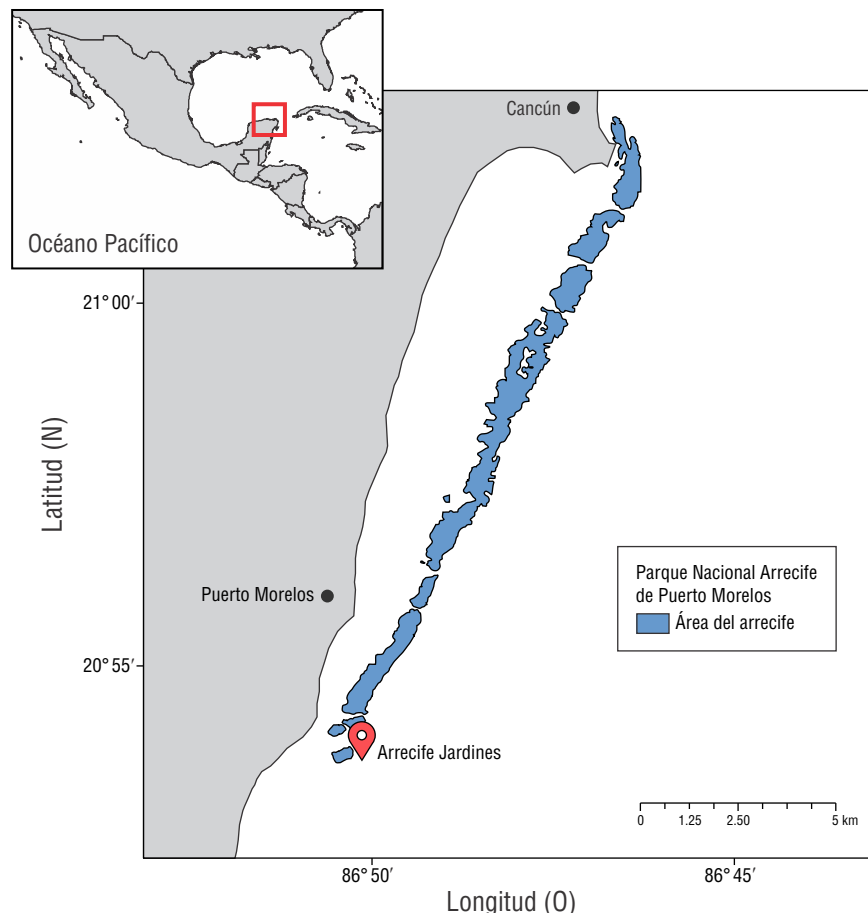


Figura 1. Localización del Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos (PNAPM) (cuadro rojo) en México. El marcador rojo denota el sitio de estudio.

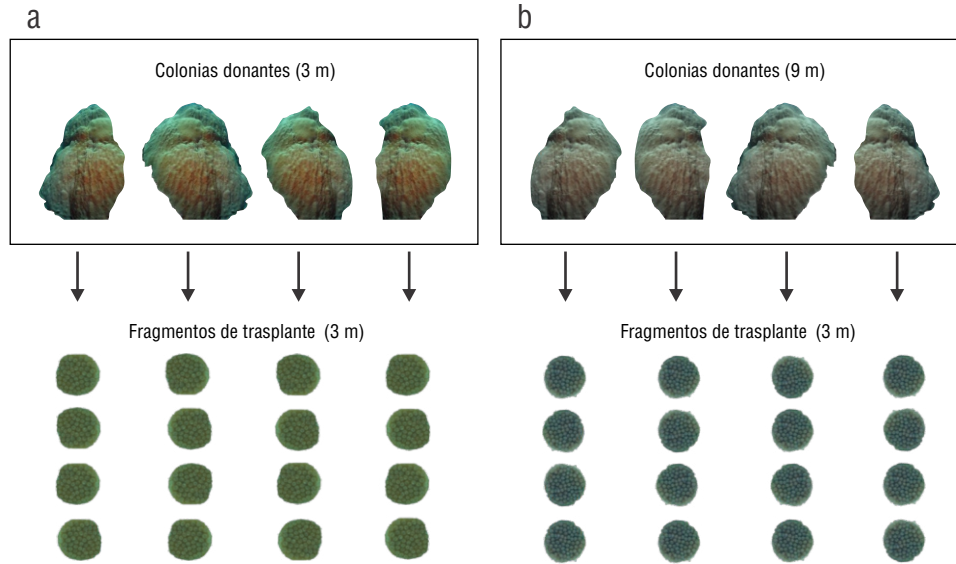


Figura 2. Diseño experimental. Se recolectaron fragmentos de corales donantes a 2 profundidades: (a) 3 m (tratamiento de control) y (b) 9 m (tratamiento de trasplante). Se obtuvieron 4 fragmentos de cada colonia donante, los cuales fueron trasplantados a 3 m de profundidad.

(ANDEVA) de una vía, utilizando modelos lineales generalizados, para evaluar las diferencias en los parámetros de crecimiento a nivel de tratamiento y tiempo (mensual), incluyendo su interacción. Por último, se utilizaron modelos de regresión lineal simple (r^2) para evaluar las relaciones entre las características de crecimiento y los factores ambientales (temperatura y RFA). Se realizaron todos los análisis estadísticos en el programa SigmaPlot v. 11 (Grafiti LLC, Palo Alto, EE. UU.), utilizando un intervalo de confianza del 95% ($\alpha = 0.05$).

RESULTADOS

Extensión lineal

Al final del periodo de experimentación no se observaron señales de blanqueamiento, pérdida o muerte del tejido en ninguno de los fragmentos en los 2 tratamientos. El crecimiento en extensión lineal presentó un incremento acumulado de 0.74 cm para el tratamiento de control después de un periodo de 9 meses, mostrando un crecimiento mensual de 0.09 ± 0.02 cm (rango: 0.04-0.26) (Tabla 1). Por otro lado, el tratamiento de trasplante presentó un crecimiento total acumulado de 0.70 cm, con un promedio mensual de 0.08 ± 0.01 cm (rango: 0.06-0.64). El crecimiento anual de la extensión lineal fue de 1.04 ± 0.18 cm·año⁻¹ y 1.11 ± 0.23 cm·año⁻¹ para el tratamiento de control y el tratamiento de trasplante, respectivamente. Los resultados obtenidos para la extensión lineal indicaron que no existían diferencias significativas entre los tratamientos ($F_{1,69} = 0.050$, $P > 0.823$), ni en el tiempo (meses; $F_{6,69} = 2.154$, $P > 0.061$), ni en la interacción entre las variables ($F_{6,69} = 0.745$, $P > 0.616$) (Fig. 3). El crecimiento relativo de la extensión lineal aumentó de forma similar (control: 16%; trasplante: 15%) (Tabla 2).

Diámetro apical

El crecimiento total acumulado del diámetro apical para el tratamiento de control después del periodo de estudio fue de 0.96 cm, con un promedio mensual de 0.12 ± 0.02 cm (rango: 0.06-0.17) (Tabla 1). El crecimiento total acumulado del tratamiento de trasplante fue de 1.03 cm, con un promedio mensual de 0.13 ± 0.03 cm (rango: 0.09-0.22). El crecimiento anual del diámetro apical fue de 1.45 ± 0.67 cm·año⁻¹ para el tratamiento de control y de 1.54 ± 0.40 cm·año⁻¹ para el tratamiento de trasplante.

Los resultados del diámetro apical no mostraron diferencias significativas entre los tratamientos ($F_{1,69} = 0.0641$, $P > 0.801$), ni en el tiempo (meses; $F_{6,69} = 0.365$, $P > 0.898$), ni en la interacción entre las variables ($F_{6,69} = 0.599$, $P > 0.730$) (Fig. 4). El crecimiento del diámetro apical incrementó en un 23% para el tratamiento de control y en un 24% para el tratamiento de trasplante (Tabla 2).

Variabes ambientales

La temperatura de la superficie de mar para el PNAPM durante el periodo de estudio presentó un promedio mensual de 28.62 °C (25.95-30.56 °C) (Tabla 1), con los valores más altos en los meses de agosto y septiembre (~30.32 °C) y los valores más bajos en los meses de enero y febrero (~26.21 °C). Por otro lado, la irradiancia se mantuvo en un promedio de 52,286 $\mu\text{mol}\cdot\text{quanta}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, con los valores más bajos en noviembre (42,145 $\mu\text{mol}\cdot\text{quanta}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$) y valores máximos en agosto (60,112 $\mu\text{mol}\cdot\text{quanta}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$) (Tabla 1). Los valores más altos de temperatura e incidencia lumínica se presentaron en el mes de agosto; sin embargo, los resultados de los modelos de regresión lineal indicaron que no existía una relación

Tabla 1. Las variables de crecimiento ($\text{cm}\cdot\text{mes}^{-1}$) medidos en los fragmentos de *Orbicella faveolata* en el tratamiento de trasplante y el tratamiento de control a 3 m de profundidad y las variables ambientales medidos en el Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos (PNANP).

Mes	Trasplante		Control		Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	RFA ($\mu\text{mol}\cdot\text{quanta}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)
	Extensión lineal (cm)	Diámetro apical (cm)	Extensión lineal (cm)	Diámetro apical (cm)		
Junio	0.64 ± 0.67	0.15 ± 0.15	0.04 ± 0.05	0.06 ± 0.11	29.61 ± 1.09	$52,539 \pm 39,084$
Agosto	0.11 ± 0.09	0.18 ± 0.16	0.13 ± 0.10	0.12 ± 0.17	30.56 ± 1.10	$60,112 \pm 40,072$
Septiembre	0.06 ± 0.07	0.09 ± 0.07	0.07 ± 0.05	0.17 ± 0.18	30.09 ± 0.97	$54,275 \pm 38,510$
Octubre	0.10 ± 0.07	0.17 ± 0.08	0.08 ± 0.07	0.14 ± 0.12	29.94 ± 0.88	$54,513 \pm 34,755$
Noviembre	0.13 ± 0.14	0.09 ± 0.04	0.26 ± 0.24	0.14 ± 0.11	27.21 ± 0.87	$42,145 \pm 28,672$
Enero	0.08 ± 0.10	0.10 ± 0.06	0.04 ± 0.01	0.16 ± 0.21	25.95 ± 1.15	$42,612 \pm 30,077$
Febrero	0.13 ± 0.09	0.22 ± 0.19	0.09 ± 0.06	0.15 ± 0.21	26.48 ± 1.10	$52,144 \pm 34,325$

RFA: radiación fotosintéticamente activa.

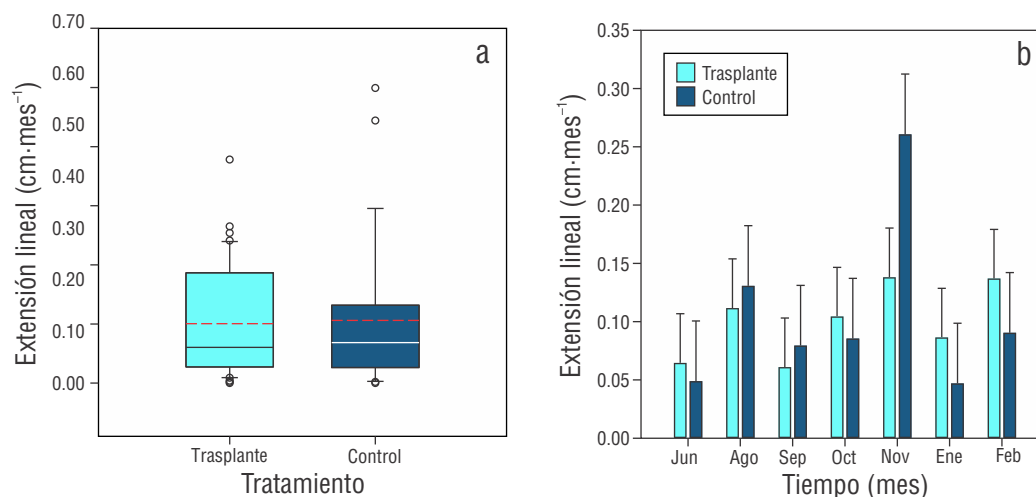


Figura 3. Diagramas de caja del crecimiento mensual promedio de la extensión lineal (\pm DE) de *Orbicella faveolata* a 3 m de profundidad durante 9 meses por (a) tratamiento (la línea negra representa la mediana y la línea roja punteada denota la media) y (b) tiempo (meses).

determinística (r^2) entre las variables ambientales, ni con la extensión lineal ($P > 0.05$), ni con el diámetro apical ($P > 0.05$).

DISCUSIÓN

El crecimiento esquelético en los corales es controlado por diversos factores, como la salinidad, los nutrientes, la exposición al oleaje, la sedimentación, el estado de saturación de aragonita, la temperatura y la luz, siendo estos 2 últimos los de mayor influencia (Nybakken 2001, Sheppard et al. 2009, Veron 2010, Calderón-Aguilera et al. 2017). En el caso de la luz, se ha planteado que la tasa de calcificación promedio, así como la tasa de extensión, disminuye de forma proporcional con la disminución de la irradiancia debido al aumento de profundidad (Dustan 1975, Bosscher 1993). Por el contrario,

en aguas someras, la irradiancia puede alcanzar niveles excesivos de energía, produciendo el fotodaño por estrés oxidativo (i.e., el incremento de especies reactivas de oxígeno) que reduce la capacidad fotosintética del alga simbionte (Todd et al. 2004, Rodríguez-Troncoso et al. 2014).

En estudios previos enfocados en la relación entre la morfología de los corales y la luz, se ha demostrado que las colonias modifican su morfología a formas más planas conforme aumenta la profundidad para aumentar su capacidad de capturar la luz (Graus y Macintyre 1982, Willis 1987, Gutiérrez-Estrada 2017, Prada et al. 2022). Ow y Todd (2010) sugirieron que estos cambios morfológicos proporcionan una solución a largo plazo que requiere una menor inversión de energía en comparación con la energía necesaria para realizar un ajuste fisiológico.

El efecto de la intensidad interlumínica en las características de crecimiento esquelético y la morfología de los corales hermatípicos ha sido estudiado anteriormente (Graus y Macintyre 1982, Hubbard y Scature 1985, Carricart-Ganivet et al. 2007, Todd 2008, Gutiérrez-Estrada 2017, Mallon et al. 2022). Sin embargo, el efecto del trasplante de corales entre profundidades con condiciones lumínicas ambientales diferentes ha sido poco explorado. Este trabajo muestra una rápida respuesta en el crecimiento esquelético del coral *O. faveolata* y su plasticidad fisiológica a corto plazo (1-9 meses), lo que podría ser un mecanismo para compensar los efectos del trasplante entre sitios con diferentes gradientes lumínicos. Por lo tanto, el coral *O. faveolata* muestra una plasticidad fisiológica a corto plazo que posiblemente conlleva una modificación

morfotípica a largo plazo (>1 año), lo cual le permite aclimatarse a nuevos ambientes lumínicos.

En el mar Caribe se ha reportado que los corales del género *Orbicella* son fisiológicamente capaces de vivir en hábitats someros o profundos por lo menos 6 meses después de ser trasplantados (trasplante de hábitat somero a hábitat profundo y de hábitat profundo a hábitat somero) (Prada et al. 2022). Este hallazgo coincide con los resultados obtenidos para este estudio; *O. faveolata* mostró plasticidad fisiológica (en términos de crecimiento) ante cambios lumínicos y cambios de profundidad. Esto podría explicar cómo los corales del género *Orbicella* se han adaptado a diferentes ambientes lumínicos mediante un balance energético vía autótrofia y heterotrofia en relación a la disponibilidad de la luz (Prada et al. 2022).

Tabla 2. Incremento en el porcentaje (%) de crecimiento mensual para las variables de extensión lineal y diámetro apical de los fragmentos de *Orbicella faveolata* en el tratamiento de control y el tratamiento de trasplante a 3 m de profundidad.

Mes	Trasplante		Control	
	Extensión lineal (cm)	Diámetro apical (cm)	Extensión lineal (cm)	Diámetro apical (cm)
Junio	1.37 ± 1.34	3.92 ± 3.92	1.38 ± 1.88	1.67 ± 2.84
Agosto	2.44 ± 2.44	4.78 ± 4.70	3.50 ± 3.70	3.05 ± 4.36
Septiembre	1.16 ± 1.32	2.03 ± 1.82	1.78 ± 1.56	4.11 ± 4.33
Octubre	2.34 ± 2.05	3.86 ± 1.90	2.08 ± 2.23	3.55 ± 3.62
Noviembre	2.54 ± 2.69	1.96 ± 0.99	4.70 ± 4.36	3.27 ± 2.72
Enero	2.08 ± 3.14	2.31 ± 1.60	0.88 ± 0.21	3.70 ± 5.07
Febrero	3.07 ± 2.70	4.83 ± 4.38	1.81 ± 1.31	3.15 ± 4.23

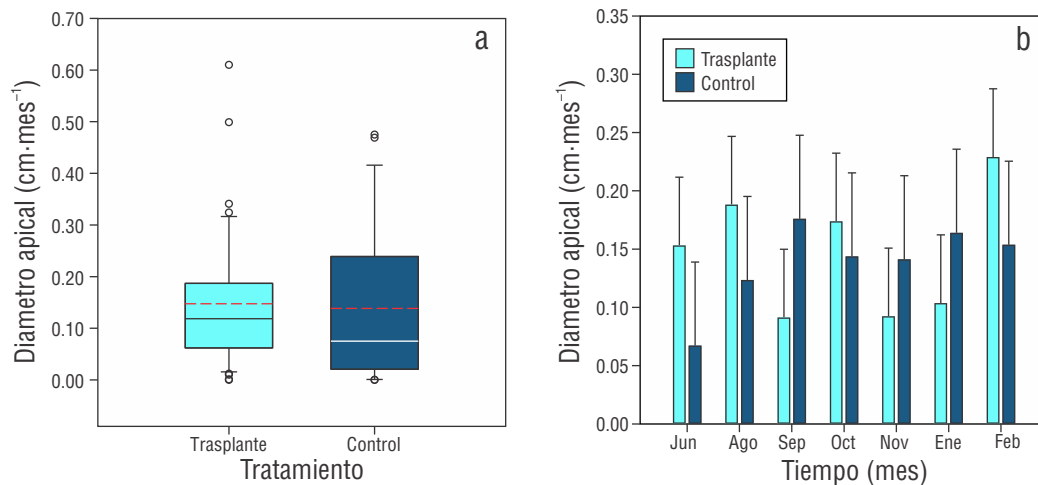


Figura 4. Diagramas de caja del crecimiento mensual del diámetro apical (\pm DE) de *Orbicella faveolata* a 3 m de profundidad durante 9 meses por (a) tratamiento (la línea negra representa la mediana y la línea roja punteada denota la media) y (b) tiempo (meses).

Nuestros resultados demostraron que las colonias del tratamiento de trasplante alcanzaron rápidamente la tasa de crecimiento de las colonias del tratamiento de control, mostrando un crecimiento mensual similar durante el periodo de 9 meses del estudio. A 3 m de profundidad, la extensión lineal anual para el tratamiento de control y el tratamiento de trasplante fue de $1.04 \text{ cm}\cdot\text{año}^{-1}$ y $1.11 \text{ cm}\cdot\text{año}^{-1}$, respectivamente. Estos resultados contrastan con la tasa de extensión ($0.80 \text{ cm}\cdot\text{año}^{-1}$) reportado para *O. faveolata* a 9 m de profundidad en el Caribe mexicano (Gutiérrez-Estrada 2017). En Florida (EE. UU.) se ha reportado un patrón similar, donde la extensión lineal de las colonias de la zona somera fue mayor a la de las colonias de la zona profunda (>6 m) durante el mismo periodo de tiempo (Manzello et al. 2015). Gutiérrez-Estrada (2017) sugirieron que esto podría deberse a que la extensión esquelética depende del número de diseppimentos exotocales depositados al año, mientras que la densidad depende de su grosor, los cuales están influenciados directamente por la luz azul (lunar) y las condiciones lumínicas detectadas por los corales a profundidades relativamente someras.

En ambientes lumínicos que favorecen el crecimiento óptimo se ha observado que las colonias masivas de *Porites* exhiben un mayor crecimiento en la extensión lineal en contraste con las colonias ubicadas en ambientes con alta turbidez (Lough et al. 1999). Además, se ha reportado que las colonias trasplantadas a ambientes más someros muestran un incremento en su extensión lateral (diámetro), lo cual coincide con los resultados del presente estudio (Tabla 1). Esto podría explicarse por el tamaño de los fragmentos de coral ($3\text{-}3.5 \text{ cm}^2$); al fragmentarse una colonia sexualmente madura, los recursos del coral se destinan al crecimiento y la calcificación en lugar de a la gametogénesis (Forsman et al. 2015). En este contexto, el sitio de trasplante y el genotipo de origen pueden influir en las tasas de calcificación, resultando en un efecto de la interacción entre el control ambiental y parental en las características esqueléticas de los corales masivos (Smith et al. 2007). Esto podría sugerir que la morfología de las colonias varía según el hábitat, resultando en una alta plasticidad fenotípica en las características esqueléticas de los corales (Smith et al. 2007).

Reportes previos con metodologías similares a este estudio han encontrado que las especies de corales, como *Turbinaria mesenterina*, encontradas a profundidades de 1 m (somero) y 4 m (profundo) lograron adaptarse a las condiciones ambientales de ambas profundidades después de ser trasplantadas; no obstante, su crecimiento fue más lento en la zona profunda (Willis 1987). En otras especies de corales masivos se han observado patrones similares en corales trasplantados a diferentes ambientes. Por ejemplo, Ow y Todd (2010) encontraron un crecimiento mayor en colonias de *Goniastrea pectinata* trasplantadas a una profundidad de 7 m en contraste con el crecimiento de las colonias trasplantadas a una profundidad de 3 m después de un periodo corto (163 días). Esto pudiera explicar la alta plasticidad fenotípica y la respuesta fotoadaptativa a la irradiancia lumínica de algunos géneros de

corales masivos, como *Porites* y *Orbicella*, que les permiten distribuirse a un amplio gradiente lumínico (Smith et al. 2007, Todd 2008).

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos indican que no hubo diferencias significativas en la extensión lineal o el diámetro apical entre los tratamientos ni en el tiempo (meses). Por lo tanto, el coral *O. faveolata* tiene el potencial de aclimatarse a nuevas condiciones lumínicas ambientales tras ser trasplantado de un ambiente profundo a un ambiente somero en un periodo corto de tiempo. Además, sugerimos que las colonias del tratamiento de trasplante pueden alcanzar tasas de crecimiento similares a las de las colonias del tratamiento de control relativamente rápido (1-9 meses), demostrando una plasticidad fenotípica ante cambios en su ambiente lumínico. Haciendo énfasis en el crecimiento radial de las colonias, observamos un mayor incremento en el diámetro en comparación con la extensión lineal en ambos tratamientos; por lo tanto, podemos concluir que las colonias de ambos tratamientos emplearon los recursos disponibles en reparar el daño en la periferia ocasionado por el corte en el tejido vivo.

A pesar de la capacidad de *O. faveolata* para aclimatarse a diferentes condiciones ambientales lumínicas, como se destaca en este estudio, el periodo de estudio fue relativamente corto para lograr determinar si la respuesta a corto plazo será beneficiosa a largo plazo o si podría comprometer la supervivencia y salud de la colonia en el futuro. Debido a esto, sugerimos llevar a cabo estudios similares que consideren periodos de tiempo de largo plazo (>9 meses). La información de este estudio revela que las colonias de *O. faveolata* trasplantadas de un ambiente profundo a uno somero tienen el potencial para aclimatarse fisiológicamente a las nuevas condiciones lumínicas en un periodo corto de tiempo.

Declaraciones finales

Agradecimientos

Agradecemos a las autoridades mexicanas del Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos (SEMARNAT y CONANP) por el permiso de colecta (número de bitácora 23/LW-0103/04/21) y facilidades proporcionadas. También agradecemos a Miguel I. Gómez Reali, Edgar Escalante Mancera y Fernando Negrete Soto por su asistencia durante el trabajo de campo.

Fondos

El presente trabajo fue apoyado por la beca doctoral del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnologías (CONAHCYT) otorgado a GGE (CVU No. 563743) y el proyecto PAPIIT IN200420 otorgado a JPCG.

Conflictos de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Contribuciones de los autores

Conceptualización: GGE, JJATL y JPCG; Curación de datos: JLJ; Análisis formal: JJATL y JLJ; Adquisición de financiamiento: JPCG; Metodología: GGE, JJATL; *Software*: JLJ y JJATL; Supervisión: JJATL y JPCG; Validación: GGE, JJATL y JPCG; Visualización: JLJ y JJATL; Redacción—borrador original: JLJ y JJATL; Redacción—revisión y edición: JLJ, JJATL, GGE y JPCG.

Disponibilidad de datos

Se pueden obtener los datos para este estudio a través del autor correspondiente bajo petición razonable.

Uso de herramientas de IA

Los autores no utilizaron ninguna herramienta de inteligencia artificial para este trabajo.

REFERENCIAS

- Allemand D, Tambutte E, Zoccola D, Tambutte S. 2011. Coral calcification, cells to reefs. In: Dubinsky Z, Stambler N (eds.), *Coral reefs: an ecosystem in transition*. New York (USA): Springer. p. 119-150.
- Alvarez-Filip L, Estrada-Saldívar N, Pérez-Cervantes E, Molina-Hernández A, González-Barrios FJ. 2019. A rapid spread of the stony coral tissue loss disease outbreak in the Mexican Caribbean. *PeerJ Preprints*. 7:e27893v1. <https://doi.org/10.7287/peerj.preprints.27893v1>
- Alvarez-Filip L, González-Barrios FJ, Pérez-Cervantes E, Molina-Hernández AM, Estrada-Saldívar N. 2022. Stony coral tissue loss disease decimated Caribbean coral populations and reshaped reef functionality. *Commun Biol*. 5:440. <https://doi.org/10.1038/s42003-022-03398-6>
- Bosscher H. 1993. Computerized tomography and skeletal density of coral skeletons. *Coral Reefs*. 12:97-103. <https://doi.org/10.1007/BF00302109>
- Caballero-Aragón H, Perera-Valderrama S, Cerdeira-Estrada S, Martell-Dubois R, Rosique-de la Cruz L, Álvarez-Filip L, Pérez-Cervantes E, Estrada-Saldívar N, Ressler R. 2020. Puerto Morelos coral reefs, their current state and classification by a scoring system. *Diversity*. 12(7):272. <https://doi.org/10.3390/d12070272>
- Calderón-Aguilera LE, Reyes-Bonilla H, Norzagaray-López CO, López-Pérez RA. 2017. Los arrecifes coralinos de México: Servicios ambientales y secuestro de carbono. *Elem Polit Públ*. 1:53-62.
- Carricart-Ganivet JP, Lough JM, Barnes DJ. 2007. Growth and luminescence characteristics in skeletons of massive *Porites* from a depth gradient in the central Great Barrier Reef. *J Exp Mar Biol Ecol*. 351(1-2):27-36. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2007.05.038>
- Chave KE, Smith SV, Roy KJ. 1972. Carbonate production by coral reefs. *Mar Geol*. 12(2):123-140. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(72\)90024-2](https://doi.org/10.1016/0025-3227(72)90024-2)
- Colombo-Pallotta MF, Rodríguez-Román A, Iglesias-Prieto R. 2010. Calcification in bleached and unbleached *Montastraea faveolata*: evaluating the role of oxygen and glycerol. *Coral Reefs*. 29:899-907. <https://doi.org/10.1007/s00338-010-0638-x>
- [CONANP] Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. 2000. Programa de Manejo del Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos. Puerto Morelos (Mexico): CONANP. Management program. 225 p.
- Dustan P. 1975. Growth and form in the reef-building coral *Montastrea annularis*. *Mar Biol*. 33:101-107. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00390714>
- Enríquez S, Méndez ER, Iglesias-Prieto R. 2005. Multiple scattering on coral skeletons enhances light absorption by symbiotic algae. *Limnol Oceanogr*. 50(4):1025-1032. <https://doi.org/10.4319/lo.2005.50.4.1025>
- Enríquez S, Méndez ER, Hoegh-Guldberg O, Iglesias-Prieto R. 2017. Key functional role of the optical properties of coral skeletons in coral ecology and evolution. *Proc R Soc B*. 284:1-9. <https://doi.org/10.1098/rspb.2016.1667>
- Fitt WK, McFarland FK, Warner ME, Chilcoat GC. 2000. Seasonal patterns of tissue biomass and densities of symbiotic dinoflagellates in reef corals and relation to coral bleaching. *Limnol Oceanogr*. 45(3):677-685. <https://doi.org/10.4319/lo.2000.45.3.0677>
- Foster AB. 1979. Phenotypic plasticity in the reef corals *Montastraea annularis* (Ellis & Solander) and *Siderastrea siderea* (Ellis & Solander). *J Exp Mar Biol Ecol*. 39(1):25-54. [https://doi.org/10.1016/0022-0981\(79\)90003-0](https://doi.org/10.1016/0022-0981(79)90003-0)
- Forsman ZH, Page CA, Toonen RJ, Vaughan D. 2015. Growing coral larger and faster: micro-colony-fusion as a strategy for accelerating coral cover. *PeerJ*. 16:e1313. <https://doi.org/10.7717/peerj.1313>
- Graus RR, Macintyre IG. 1976. Light control of growth form in colonial reef corals: a computer simulation. *Science*. 193(4256):895-897. <https://doi.org/10.1126/science.193.4256.895>
- Graus RR, Macintyre IG. 1982. Variation in forms of the Reef Coral *Montastraea annularis* (Ellis and Solander): A quantitative evaluation of growth response to light distribution using computer simulation. In: Klaus R, Macintyre IG (eds.), *The Atlantic Barrier Ecosystem at Carrie Bow Cay, Belize I. Structure and Communities*. Washington (USA): Smithsonian Institution Press. p. 441-464.
- Gutiérrez-Estrada G. 2017. Relación entre las características de crecimiento y los diseños en *Orbicella faveolata* creciendo en un gradiente lumínico [dissertation]. [Mexico]: Universidad Nacional Autónoma de México. 39 p.
- Houlbrèque F, Ferrier-Pagès C. 2009. Heterotrophy in tropical scleractinian corals. *Biol Rev*. 84(1):1-17
- Kaniewska P, Magnusson SH, Anthony KRN, Reef R, Kühl M, Hoegh-Guldberg O. 2011. Importance of macro-versus microstructure in modulating light levels inside coral colonies. *J Phycol*. 47(4):846-860. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2011.01021.x>
- Kramer N, Guan J, Chen S, Wangpraseurt D, Loya Y. 2021. Characterization of morpho-functional traits in mesophotic corals reveals optimized light capture and photosynthesis. *bioRxiv*. 2021(09). <https://doi.org/10.1101/2021.09.29.462347>
- Hubbard DK, Scaturro D. 1985. Growth rates of seven species of scleractinian corals from Cane Bay and Salt River, St. Croix, USVI. *Bull Mar Sci*. 36:325-338.
- Klaus J, Budd AF, Heikoop JM, Fouke BW. 2007. Environmental controls on corallite morphology in the reef coral *Montastraea annularis*. *Bull Mar Sci*. 80:233-260.

- Kleypas JA, Buddemeier RW, Archer D, Gattuso JP, Langdon C, Opdyke BN. 1999. Geochemical consequences of increased atmospheric carbon dioxide on coral reefs. *Science*. 284(5411):118-120. <https://doi.org/10.1126/science.284.5411.118>
- Lough JM, Barnes DJ, Devereux MJ, Tobin BJ, Tobin S. 1999. Variability in growth characteristics of massive *Porites* on the Great Barrier Reef. *CRC Reef Res Cen Tech Rep*. 28:95.
- Manzello DP, Enochs IC, Kolodziej G, Carlton R. 2015. Recent decade of growth and calcification of *Orbicella faveolata* in the Florida Keys: an inshore-offshore comparison. *Mar Ecol Prog Ser*. 521:81-89. <https://doi.org/10.3354/meps11085>
- Mallon J, Cyronak T, Hall ER, Banaszak AT, Exton DA, Bass AM. 2022. Light-driven dynamics between calcification and production in functionally diverse coral reef calcifiers. *Limnol Oceanogr*. 67(2):434-449. <https://doi.org/10.1002/lno.12002>
- Merks MH, Hoekstra AG, Kaandorp JA, Sloot PMA. 2004. Polyp oriented modelling of coral growth. *J Theor Biol*. 228(4):559-576. <https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2004.02.020>
- Molina-Ramos SI. 2020. Estado de conservación y cambios en el arrecife del Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos ante las amenazas antropogénicas [dissertation]. [Mexico]: Universidad Iberoamericana Puebla. 55 p.
- Nybakken JW. 2001. *Marine Biology: an ecological approach*. 5th ed. San Francisco (USA): Benjamin Cummings. 516 p.
- Ow YX, Todd PA. 2010. Light-induced morphological plasticity in the scleractinian coral *Goniastrea pectinata* and its functional significance. *Coral Reefs*. 29:797-808. <https://doi.org/10.1007/s00338-010-0631-4>
- Page CA. 2013. Reskinning a reef: Mote marine lab scientists explore a new approach to reef restoration. *Reef Mar Aqua Mag*. 72-8. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4281.0967>
- Perry CT, Alvarez-Filip L. 2018. Changing geo-ecological functions of coral reefs in the Anthropocene. *Funct Ecol*. 33(6):976-988. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.13247>
- Prada C, López-Londoño T, Pollock FJ, Roitman S, Ritchie KB, Levitan DR, Knowlton N, Woodley C, Iglesias-Prieto R, Medina M. 2022. Linking photoacclimation responses and microbiome shifts between depth-segregated sibling species of reef corals. *R Soc Open Sci*. 9:14. <https://doi.org/10.1098/rsos.211591>
- Rico-Esenaro SD, Tortolero-Langarica JJA, Iglesias-Prieto R, Carricart-Ganivet JP. 2023. The $\delta^{15}N$ in *Orbicella faveolata* organic matter reveals anthropogenic impact by sewage inputs in a Mexican Caribbean coral reef lagoon. *Environ Sci Pollut Res*. 30:118872-118880. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-30476-x>
- Rodríguez-Martínez RE, Ruíz-Rentería F, Tussenbroek B, Barba-Santos G, Escalante-Mancera E, Jordán-Garza G, Jordán-Dahlgren E. 2010. Environmental state and tendencies of the Puerto Morelos CARICOMP site, México. *Rev Biol Trop*. 58(supp 3):23-43.
- Rodríguez-Troncoso AP, Tortolero-Langarica JJA. 2014. Corales: organismos base constructores de los ecosistemas arrecifales. In: Cifuentes-Lemus JL, Cupul-Magaña FG (eds.), *Temas sobre Investigaciones Costeras*. Guadalajara (Mexico): Universidad de Guadalajara. p. 33-55.
- Ruiz-Rentería F, Tussenbroek B, Jordán-Dahlgren E. 1998. Puerto Morelos, Quintana Roo, México. In: Björn Kjerfve (ed.), *Caribbean Coral Reef, Seagrass and Mangrove Sites*. Puerto Morelos (Mexico): UNESCO. p. 57-66.
- [SAMMO] Sistema Académico de Monitoreo Meteorológico y Oceanográfico. 2002. Datos Actuales Estación Puerto Morelos, Quintana Roo, México. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México; [15 marzo 2022]. <https://sammo.icmyl.unam.mx>.
- Scheufen T, Iglesias-Prieto R, Enriquez S. 2017. Changes in the number of symbionts and *Symbiodinium* cell pigmentation modulate differentially coral light absorption and photosynthetic performance. *Front Mar Sci*. 4:1-16. <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00309>
- Schneider C, Rasband W, Eliceiri K. 2012. NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nat Methods*. 9:671-675. <https://doi.org/10.1038/nmeth.2089>
- Sheppard CRC, Davy SK, Pilling GM. 2009. *The Biology of Coral Reefs*. New York (USA): OXFORD University Press. 339 p.
- Smith LW, Barshis D, Birkeland C. 2007. Phenotypic plasticity for skeletal growth, density and calcification of *Porites lobata* in response to habitat type. *Coral Reefs*. 26:559-667. <https://doi.org/10.1007/s00338-007-0216-z>
- Teece MA, Estes B, Gelsleichter E, Lirman D. 2011. Heterotrophic y autotrophic assimilation of fatty acids by two scleractinian corals, *Montastraea faveolata* and *Porites astreoides*. *Limnol Oceanogr*. 56(4):1285-1296. <https://doi.org/10.4319/lo.2011.56.4.1285>
- Todd PA, Ladle RJ, Lewin-Koh NIJ, Chou LM. 2004. Genotype x environment interactions in transplanted clones of the massive corals *Favia speciosa* and *Diploastrea heliophora*. *Mar Ecol Prog Ser*. 271:167-182.
- Todd PA. 2008. Morphological plasticity in scleractinian corals. *Biolo Rev*. 83(3):315-337. <https://doi.org/10.1111/j.1469-185X.2008.00045.x>
- Veron JEN. 2010. *A Reef in Time*. Australia: Harvard University Press. 304 p.
- Willis BL. 1987. Phenotypic plasticity versus phenotypic stability in the reef corals *Turbinaria mesenterina* and *Pavona cactus*. In: *Morphological Variation in the reef corals Turbinaria esenterina and Pavona cactus: synthesis of transplant, histocompatibility, electrophoresis, growth, and reproduction studies* [dissertation]. [Australia]: University of North Queensland. 53-87 p.
- Yranzo A, Villamizar E, Herrera-Reveles AT, Pérez J, Boadas H, Pereira C, Rodríguez JG, Narciso S, Bustillos F, Cavada-Blanco F. 2020. Coral pilar estrella y coral estrella montañoso *Orbicella annularis* y *Orbicella faveolata* Venezuela. Venezuela: Instituto de Zoología y Ecología Tropical, EDGE of Existence, Zoological Society of London. Technical report. 38 p. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.35996.31361/1>

Este artículo forma parte de un número especial de *Ciencias Marinas* que comprende artículos seleccionados del "XII Congreso Mexicano de Arrecifes Coralinos y III Congreso Panamericano de Arrecifes Coralinos" de 2024 celebrado en Ensenada, Baja California, México.