



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA

**ESTUDIO COMPARATIVO DE LAS CARACTERÍSTICAS
ESCLEROCRONOLÓGICAS DEL CORAL HERMATÍPICO *Porites astreoides*
EN EL ARRECIFE DE PUERTO MORELOS BAJO DIFERENTES
CONDICIONES AMBIENTALES**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRA EN CIENCIAS

PRESENTA:
JANELLE SACNITÉ CHÁVEZ BARRERA

TUTOR PRINCIPAL:
DR. JUAN PABLO CARRICART GANIVET
UNIDAD ACADÉMICA DE SISTEMAS ARRECIFALES, ICMyL UNAM

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR:

DR. GUILLERMO JAVIER HORTA PUGA
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES IZTACALA, UNAM

DR. PAUL BLANCHON
UNIDAD ACADÉMICA DE SISTEMAS ARRECIFALES, ICMyL, UNAM

DR. LORENZO ÁLVAREZ FILIP
UNIDAD ACADÉMICA DE SISTEMAS ARRECIFALES, ICMyL, UNAM

DR. ISMAEL MARIÑO TAPIA
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES, UNIDAD MÉRIDA, UNAM

ASESOR EXTERNO:
M. EN C. E. EDGAR ESCALANTE MANCERA
UNIDAD ACADÉMICA DE SISTEMAS ARRECIFALES, ICMyL, UNAM

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX, ABRIL 2024



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Índice General

Índice de Figuras	ii
Índice de Gráficas	iii
Índice de tablas	iv
Agradecimientos.....	v
Resumen	1
Introducción	2
Objetivos	9
Objetivo general	9
Objetivos particulares.....	9
Materiales y métodos	10
Zona de estudio	10
Características esclerocronológicas.....	13
Caracterización de variables ambientales.....	14
Análisis De Datos.....	14
Resultados	15
Características esclerocronológicas de <i>Porites astreoides</i>	15
Caracterización ambiental.....	20
Discusión	25
Conclusiones	28
Perspectivas y recomendaciones.....	29
Literatura citada.....	31
Anexos	41

Índice de Figuras

Figura 1. Mapa de distribución del coral hermatípico <i>Porites astreoides</i> (IUCN, 2022)	3
Figura 2. Diagrama esquemático que representa el entorno que origina e interactúa con los ojos de agua. Modificado de Null <i>et al.</i> 2014.	7
Figura 3. Mapa de los sitios muestreados en el Parque Nacional Arrecifes de Puerto Morelos. a) Ojo de Agua Norte (OAN), b) Laguna Arrecifal y c) Arrecife Posterior.	11
Figura 4. Fotografías de los sitios muestreados. a) Vista frontal del OAN, b) OAN, c) Laguna Arrecifal y d) Arrecife Posterior.	12

Índice de Gráficas

Gráfica 1. Tasa de extensión anual en los tres sitios.	15
Gráfica 2. Gráfica de los niveles de marea y temperaturas del OAN y Laguna durante el periodo de mayo a junio de 2014.	16
Gráfica 3. Tasa de calcificación anual en los tres sitios..	16
Gráfica 4. Grosor de tejido en los tres sitios.	17
Gráfica 5. Medidas morfométricas de las colonias.	18
Gráfica 6. Representa la regresión lineal entre las principales características esclerocronológicas .	19
Gráfica 7. Temperatura del agua registrados con Hobos, día a día en intervalos de 15 minutos en cada sitio de muestreo durante el periodo del 27 de febrero al 05 de junio de 2014.	21
Gráfica 8. Temperatura del agua en cada sitio de muestreo de acuerdo con el horario, periodo del 27 de febrero al 05 de junio de 2014.	22
Gráfica 9. Temperaturas medias del agua por día registradas entre el 28 de febrero de 2014 hasta al 4 de junio de 2014.	23
Gráfica 10. Gráfica de los niveles de marea y temperaturas del OAN y Laguna durante el periodo de mayo a junio de 2014.	24

Índice de tablas

Tabla 1. Tabla de periodo en horas para los diferentes parámetros en los tres sitios	20
Tabla 2. Valores de extensión esquelética, tasa de calcificación y densidad promedio para diferentes sitios para la especie <i>Porites astreoides</i> .	30

Agradecimientos

A mis padres y a mis hermanos por el apoyo incondicional.

A Dante, Alef y Coral por coincidir y apoyarme en este camino.

Al Dr. Juan Pablo Carricart Ganivet, por haber sido mi director de tesis, por los valiosos aportes a la investigación y por la gran paciencia a lo largo de estos años.

A los miembros del comité tutorial, Dr. Guillermo Javier Horta Puga, Dr. Paul Blanchon, Dr. Ismael Mariño Tapia, Dr. Lorenzo Álvarez Filipy al M. en C. Edgar Escalante Mancera por sus valiosas enseñanzas y asesorías.

A los miembros de la UASA que me apoyaron en distintas etapas de esta larga trayectoria, en especial a Leslie Cid, Esmeralda Pérez, Gabriela Gutiérrez (Gaby Pecas), Israel Cruz (Mac), Sergio Guendulain (Wendo), Serguei Rico.

Al Posgrado de Ciencias del Mar y Limnología de la Universidad Nacional Autónoma de México, por la formación profesional.

Al CONAHCYT (antes CONACYT) por el apoyo económico (563637), gracias por financiar el presente proyecto de investigación.

Resumen

Los sitios denominados ojos de agua tienen condiciones ambientales subóptimas para el crecimiento de los corales, aún no es claro como las características esclerocronológicas de *Porites astreoides* varían en presencia de estos sitios. Mediante técnicas de densimetría óptica se obtuvieron valores de la tasa de extensión anual, densidad media anual, la tasa de calcificación anual, además se midió el grosor de tejido y la relación largo-ancho. Para la caracterización ambiental se realizó un análisis de frecuencia de las temperaturas y mareas en los tres sitios: Ojo de Agua Norte (OAN), Laguna y Arrecife ubicados en el Sistema Arrecifal Mesoamericano. No se encontraron diferencias significativas entre la densidad y las tasas de extensión esquelética y calcificación entre los tres sitios (ANOVA de una vía; $P > 0.05$, en todos los casos). El grosor de tejido resultó tener diferencias entre los tres sitios (ANOVA de una vía, Tukey HSD). Adicionalmente, se encontraron diferencias significativas entre la relación altura-ancho entre las colonias el OAN y los otros sitios (ANOVA de una vía, Tukey HSD). Se encontró una correlación significativa entre la tasa de extensión anual y la tasa de calcificación que coincide con la estrategia reportada de crecimiento del género *Porites*.

Estudio comparativo de las características esclerocronológicas del coral hermatípico
***Porites astreoides* en el arrecife de Puerto Morelos bajo diferentes condiciones**
ambientales

Introducción

Los arrecifes de coral son uno de los ecosistemas más diversos en la Tierra que proveen una gran cantidad de bienes y servicios (Moberg y Folke, 1999; Cesar y Chong, 2003; Moberg y Rönnbäck, 2003). Los corales formadores de arrecifes se denominan hermatípicos (Mohan y Karuna, 2008), los cuales se encuentran asociados a dinoflagelados simbióticos del género *Symbiodinium* son importantes porque desempeñan un papel en la nutrición en los ambientes oligotróficos (Coffroth y Santos, 2005).

Dentro de los corales hermatípicos del género *Porites*, una de las especies más abundantes es *Porites astreoides* (*P. astreoides*), con una amplia distribución en el Océano Atlántico a lo largo de las costas de Florida, Bermudas, Brasil y África Occidental así como en el Mar Caribe (Figura 1.) (IUCN., 2022). Las colonias de *P. astreoides* frecuentemente se encuentran en sitios someros (Goreau y Wells, 1967), son colonias de tamaño pequeño entre 41-80 cm de diámetro (Edmunds, 2010;), de corta vida de alrededor 8-10 años (Madin *et al.*, 2016 citado en Eagleson *et al.*, 2023), y son denominados maleza (derivado de su nombre en inglés "weedy") (Green *et al.*, 2008). Se pueden encontrar creciendo como colonias dispersas sin crear una estructura tridimensional (Rivera y Goodbody-Gringley, 2014), ni complejidad en términos de un arrecife (Knowlton, 2001 y Loya *et al.*, 2001).

El ciclo reproductivo sexual de *P. astreoides* es hermafrodita y gonocórica y la estrategia reproductiva es por medio de incubación (del inglés *brooding*) (Chornesky y Peters, 1987; Nunes *et al.*, 2011), esta estrategia consiste en que producen y fertilizan internamente sus gametos e incuban sus larvas hasta su liberación, se ha demostrado que la estrategia de incubación les permite a algunos corales ser abundantes dentro de sus comunidades (Foster y Gilmour, 2018), además de que el simbiote *Symbiodinium* sp. es transmitida directamente de la incubación (Fadlallah, 1983). Es importante recalcar que Distintos estudios indican la alta resiliencia de la

estrategia reproductiva de *P. astreoides* v.g., Victoria-Salazar *et al.* (2015), localizaron reclutas en un parche arrecifal afectado por un encallamiento. Albright *et al.* (2008), encontraron que el pCO₂ no afecta el porcentaje de asentamiento de las larvas en tres escenarios con concentraciones de CO₂ (380, 560 y 720 ppm), estos autores demostraron que la agregación larval en *P. astreoides* después del asentamiento les ayuda a tener tasas de mortalidad bajas y crecer más rápido que si estuvieran aisladas. Por otra parte, Hennige *et al.*, (2011), encontraron que el *Symbiodinium* hospedero en *P. astreoides* tiene una alta capacidad de reparación y es altamente tolerable al blanqueamiento debido a la capacidad de mitigar los efectos de la fotoinhibición.



Legend
 EXTANT (RESIDENT)

Compiled by:
 IUCN Marine Biodiversity Unit 2022

Figura 1. Mapa de distribución del coral hermatípico *Porites astreoides* (IUCN, 2022).

Kleypas *et al.* (1999) y Guan *et al.* (2015), han estudiado que las principales condiciones ambientales con las que se correlacionan los arrecifes de coral son la temperatura, salinidad, nutrientes, estado de saturación y regímenes de luz y a su vez estas condiciones ambientales

tienen un fuerte control sobre el crecimiento coralino. No obstante, algunos autores indican que *P. astreoides* puede crecer en sitios no óptimos para su desarrollo y una alta resiliencia, vg. Tomascik y Sanders (1985), encontraron la presencia de *P. astreoides* en sitios con alta eutroficación; Por otro lado, Rodríguez-Martínez y Jordán-Dahlgren (1999) identificaron colonias pequeñas creciendo de manera epibionte en pastos marinos, en zonas arenosas, así como en cabos y en las ramas de gorgonáceos a profundidades de 1.5 a 2.5 m. Vermeij *et al.*, (2007), además reportaron la presencia y abundancia de *P. astreoides* en sitios con elevadas temperaturas, altas salinidades, altos niveles de nutrientes y sedimentación. Por otra parte, Hernández-Arana y Amenyro-Angeles (2011), documentaron la presencia de colonias en la desembocadura de una laguna costera donde las condiciones de salinidad varían entre los 20 a 35 UPS , temperaturas de 24-30 °C, así como una elevada suspensión de sedimentos durante la época de secas. Miller *et al.* (2011), determinaron que *P. astreoides* fue una de las especies menos afectada por el blanqueamiento y por el estrés térmico.

Otra de las características importantes de los corales hermatípicos está en su esqueleto, ya que el análisis de este permite la obtención de dos tipos de registros los primeros son aquellos asociados con las variables esclerocronológicas y los segundos son aquellos relacionados con el análisis geoquímico de los materiales incorporados al esqueleto del coral (Lough, 2010). Lo que permite obtener registros de la química del agua, de las condiciones ambientales y climáticas del sitio donde se desarrollan (Dodge y Brass, 1984; Dodge y Gilbert 1984; Lough y Barnes, 1989; Lough, 2010).

Los esqueletos de corales masivos muestran variaciones anuales en la densidad que aparecen como pares de bandas contiguas de alta y baja densidad reportado por primera vez por Knutson *et al.* (1972), donde radiografiaron lajas de corales masivos y fueron relacionados con patrones de crecimiento anuales. Estas bandas anuales proveen información histórica acerca de las características esclerocronológicas: la densidad media anual del esqueleto (densidad masa; g CaCO₃ cm⁻³), tasa de extensión lineal (tasa de crecimiento lineal; cm año⁻¹) y la tasa de calcificación anual (tasa de precipitación de g CaCO₃ cm³ año⁻¹). La tasa de calcificación anual es el producto de la tasa de extensión anual y el promedio de la densidad (Dodge y Brass, 1984): la cual se calcula con la fórmula:

$$\text{g CaCO}_3 \text{ cm}^{-2} \text{ año}^{-1} = \text{cm año}^{-1} \times \text{g CaCO}_3 \text{ cm}^{-3}$$

La tasa de calcificación puede ser medida por dos métodos. Los primeros son no destructivos,

como la medición directa del tamaño de la colonia (crecimiento lineal, que es la medida de la tasa de extensión lineal) o el incremento en peso por la técnica de peso boyante. Otra de las técnicas es la de anomalías de alcalinidad que permite medir la tasa de calcificación bajo condiciones a corto plazo (<1h). El segundo tipo de métodos son destructivos, mediante el análisis directo de lajas de esqueleto de coral o con rayos X que permite medir a largo plazo las tasas de crecimiento, así como el análisis con radioisótopos usando ^{45}Ca como un trazador (Allemand *et al.*, 2004).

Una característica relacionada con el crecimiento del tejido en *Porites* es que forma una capa lateral continua de varios milímetros de grosor en la superficie del esqueleto. Las bandas de densidad resultan de la variación en el grosor de los elementos esqueléticos. Cuando el grosor del tejido es delgado representa la distancia en la que una colonia se extiende en un par de meses y cuando es grueso puede representar la distancia a la que la colonia le toma más de un año en extenderse (Barnes y Lough, 1992).

Otro de los factores determinantes en la salud de los arrecifes de coral es la tasa de calcificación, debido a que muchas especies asociadas dependen de la complejidad estructural proporcionada por los esqueletos calcáreos de los corales (Bruno y Selig, 2007; Sowa *et al.*, 2013). Esta característica esclerocronológica nos da información de cómo los corales perciben su medio y puede ser usada como un proxy ambiental (Carricart-Ganivet, 2011).

Características esclerocronológicas de P. astreoides

Se ha determinado que el género *Porites* invierte los recursos de calcificación en extensión y las colonias con los esqueletos menos densos tienden a tener la mayor tasa de calcificación (Lough y Barnes, 1992). No obstante, es considerado necesario el análisis de la tasa de calcificación, la tasa de extensión anual y la densidad esquelética para poder entender la relación del crecimiento coralino y las condiciones ambientales (Dodge y Brass, 1984).

Distintas son las respuestas fisiológicas a los disturbios ambientales, uno de los primeros estudios es el de Taylor *et al.* (1993), relaciona el crecimiento de *Porites* con la luz y la

temperatura. Marubini *et al.* (2001), demostraron que la calcificación en *Porites compressa* es dependiente de la luz y con el estado de saturación de aragonita. Así mismo, Ohde y Hossain (2004), mediante experimentos con *Porites lutea* encontraron la relación entre la calcificación y estado de saturación de aragonita. Grottoli *et al.* (2006), derivado de estudios de laboratorio, en condiciones elevadas de temperatura se determinó el carbono adquirido por heterotrofia y para el caso de *Porites compressa* consume sus reservas durante condiciones de blanqueamiento.

Para el caso de *P. astreoides*, se ha visto que la calcificación aumenta con la disminución de la temperatura y en algunos sitios hay una relación entre la tasa de calcificación y Ω_{ara} (Carricart-Ganivet *et al.*, 2012) Manzello *et al.* (2015), encontraron que la calcificación es afectada negativamente con el aumento de temperatura. Mientras que, Bove *et al.* (2019), encontraron que la extensión lineal se mantenía estable ante altas temperaturas y la calcificación tuvo una ligera disminución ante altas concentraciones de CO_2 .

Crook *et al.* (2013), encontraron una disminución en la tasa de calcificación y tasa de extensión anual en *P. astreoides* donde las condiciones del agua son ácidas y bajos valores de Ω_{ara} en sitios denominados "Ojos de Agua". Posteriormente, Galindo-Martínez (2014), encontró que la tasa de calcificación instantánea promedio es mayor en un Ojo de Agua en relación con el arrecife a pesar de la producción de fotosintatos es menor y esto es debido a la capacidad de los corales a absorber una mayor cantidad de luz incidente.

Los Ojos de Agua (*submarine springs*), son sitios donde el agua dulce es liberada hacia el mar (Figura 2) (Carruthers *et al.*, 2005), se encuentran ubicados en Península de Yucatán donde hay una alta permeabilidad lo que provoca que el agua de lluvias se infiltre rápidamente al acuífero a través de toda esta red subterránea de cuevas y canales hacia lagunas costeras marinas por medio de fisuras u ojos de agua (Back, 1985; Merino *et al.*, 1990; Bauer-Gottwein *et al.*, 2011).

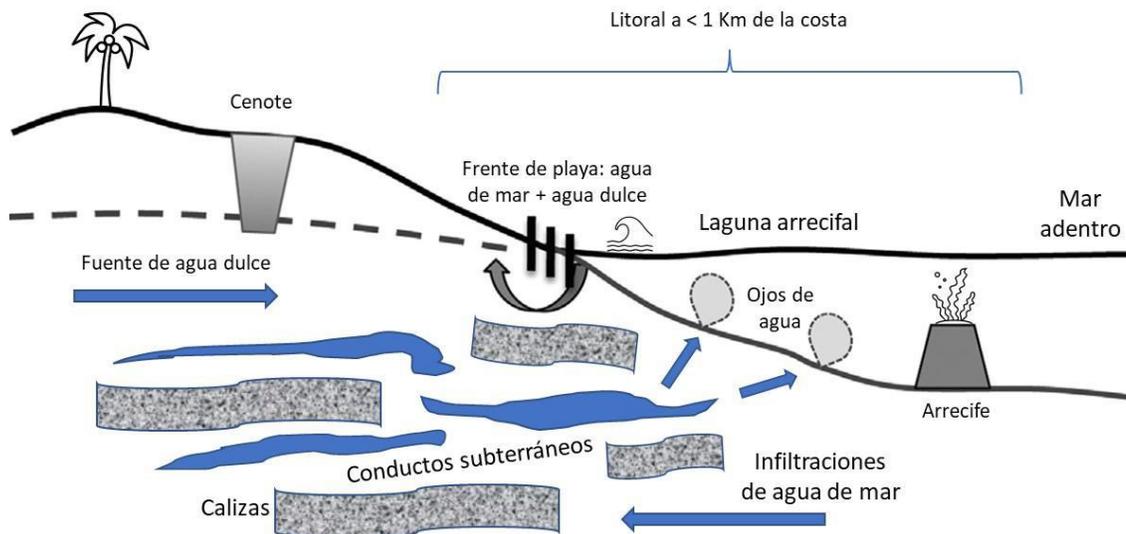


Figura 2. Diagrama esquemático que representa el entorno que origina e interactúa con los ojos de agua. Modificado de Null *et al.* 2014.

Los Ojos de Agua están caracterizados por una gran heterogeneidad y una alta variabilidad hidrogeológica (Liu *et al.*, 2011). Hofmann *et al.* (2011), indican que el pH de los ojos de agua es extremadamente variable. Crook *et al.* (2012), reportaron para el Ojo Norte valores de alcalinidad total de $3113 \pm 2 \mu\text{mol kg}^{-1}$ y de $3326 \pm 2 \mu\text{mol kg}^{-1}$, de salinidad de 28.7 y 29.2, valores de temperatura de $27 \text{ }^\circ\text{C}$ y de Ω_{ara} de 0.84 y 0.5, respectivamente para el mes de junio en 2009 y de agosto de 2010. Galindo-Martínez (2014), determinó el porcentaje de luz sub-superficial que reciben los corales es cerca del 30% de la luz.

En los últimos años ha habido un declive en la cobertura los arrecifes de coral (v.g., Gardner *et al.*, 2003; Bruno -Selig, 2007), debido a que amenaza capacidad de los arrecifes para mantener sus funciones y servicios (Hughes *et al.*, 2017). El Caribe se ha visto seriamente afectado debido a un cambio de fase en la estructura de la comunidad que destaca la disminución de la cobertura de coral y un aumento de la biomasa de macroalgas (Idjadi *et al.*, 2006), además un cambio en la composición de las especies, las constructoras de arrecife como las de los géneros *Acropora* y *Orbicella*, nombradas por Loya *et al.* (2001), “ganadoras”; por otro lado *Porites astreoides* y *Agaricia agaricites* nombradas como “perdedoras”; lo que incide en una reducción de la deposición de carbonato de calcio; que compromete la complejidad estructural del ecosistema, causando la pérdida de tridimensionalidad que afecta el estado geomorfológico de los arrecifes que dependen de la esta acumulación de carbonato de calcio y afecta directamente su viabilidad

(Alvarez-Filip *et al.*, 2013; Perry *et al.*, 2012).

Planteamiento del Problema y Justificación

El crecimiento de las colonias de corales hermatípicos es un factor clave para la resiliencia los arrecifes de coral y varía de manera sensible ante cambios ambientales. Pocas son las especies de corales hermatípicos capaces de adaptarse a las condiciones subóptimas como las de los Ojos de Agua, escenario natural adecuado para poder investigar los efectos de la variabilidad ambiental sobre las características esclerocronológicas de la especie y que permita entender la aclimatación de esta, así como sus estrategias de crecimiento.

Porites astreoides es considerado uno de los corales más prolíferos del Caribe por su alta adaptabilidad y resistencia, a pesar de los cambios en el arrecife de coral, es necesario conocer cómo las características esclerocronológicas varían en las descargas de los Ojo de Agua.

No obstante, en algunos de los estudios esclerocronológicos previos como Crook *et al.* (2013), no se ha contemplado realizar la corrección digital de las imágenes radiografiadas utilizando una interpolación del propio fondo que permite tener mediciones confiables de densidad óptica con el método de Duprey *et al.* (2012). Este es el primer trabajo realizado para *Porites astreoides* utilizando la corrección digital de las radiografías en condiciones ambientales subóptimas de las descargas de los Ojo de Agua y conocer su estrategia de crecimiento en estos sitios.

Hipótesis

"Si los valores bajos de Ω_{ara} , de pH y de temperatura afectan la calcificación en *Porites astreoides*, entonces aquellos que crecen en el Ojo de Agua Norte tendrán tasas más bajas de calcificación, de extensión linear y densidad que aquellos creciendo bajo condiciones normales en la laguna arrecifal y el arrecife"

Objetivos

Objetivo general

Evaluar el crecimiento mediante las características esclerocronológicas del coral hermatípico *Porites astreoides* en tres sitios con diferentes condiciones ambientales el Ojo de Agua Norte (OAN), Laguna Arrecifal y Arrecife Posterior de Puerto Morelos.

Objetivos particulares

1. Realizar una colecta de colonias de *P. astreoides* representativa de cada zona de estudio.
2. Obtener imágenes radiografiadas y digitalizadas para el método de densitometría óptica y corregirlas mediante el método propuesto por Duprey *et al.* (2012)
3. Medir y comparar la tasa de calcificación, tasa de extensión y densidad esquelética del coral hermatípico *Porites astreoides* entre cada sitio de estudio.
4. Medir y comparar el grosor del tejido vivo de *P. astreoides* entre cada sitio de estudio.
5. Medir las temperaturas de cada sitio de estudio durante el periodo de febrero a julio de 2014.
6. Conocer la estrategia de crecimiento de esta especie en los sitios de muestreo.

Materiales y métodos

Zona de estudio

El Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos ubicado en la parte noreste de la Península de Yucatán (Figura 3). Es un arrecife de tipo costero (Jordán-Dahlgren 1993), hay una cobertura coralina relativamente alta en la cresta y en el arrecife posterior, mientras que en el arrecife frontal debido al relieve y a la pendiente suave es colonizado por tapetes de corales. La laguna arrecifal de Puerto Morelos tiene una profundidad promedio de ~3.5 m, con una profundidad máxima de 8 m. Está delimitada por el arrecife y tiene tres entradas: a) al noreste, localmente conocida como Bocana Grande, tiene ~1200 m de ancho y 6 m de profundidad, b) la entrada central o la Bocana Chica de ~300 m de ancho y 6 m de profundidad y c) un canal de navegación al sureste de 400 m de ancho con una profundidad de 8 m (Parra *et al.*, 2014). En el fondo de la laguna de Puerto Morelos hay alrededor de 13 descargas de agua subterráneas a 500 m de la costa con una profundidad de 5 m, las cuales se distinguen durante marea baja (Crook *et al.*, 2012; Parra *et al.*, 2014). Los ojos de agua que se encuentran en el sitio son desde fracturas de 10 m hasta pequeñas depresiones circulares (del inglés “seepes”) de escasos centímetros (Crook *et al.*, 2012).

Para este estudio se escogieron tres zonas cercanas con diferentes condiciones ambientales : a) el Ojo de Agua Norte (OAN), b) la Laguna Arrecifal y c) el Arrecife Posterior (estos últimos dos sitios cercanos a la Bocana Grande) (Figura 3).

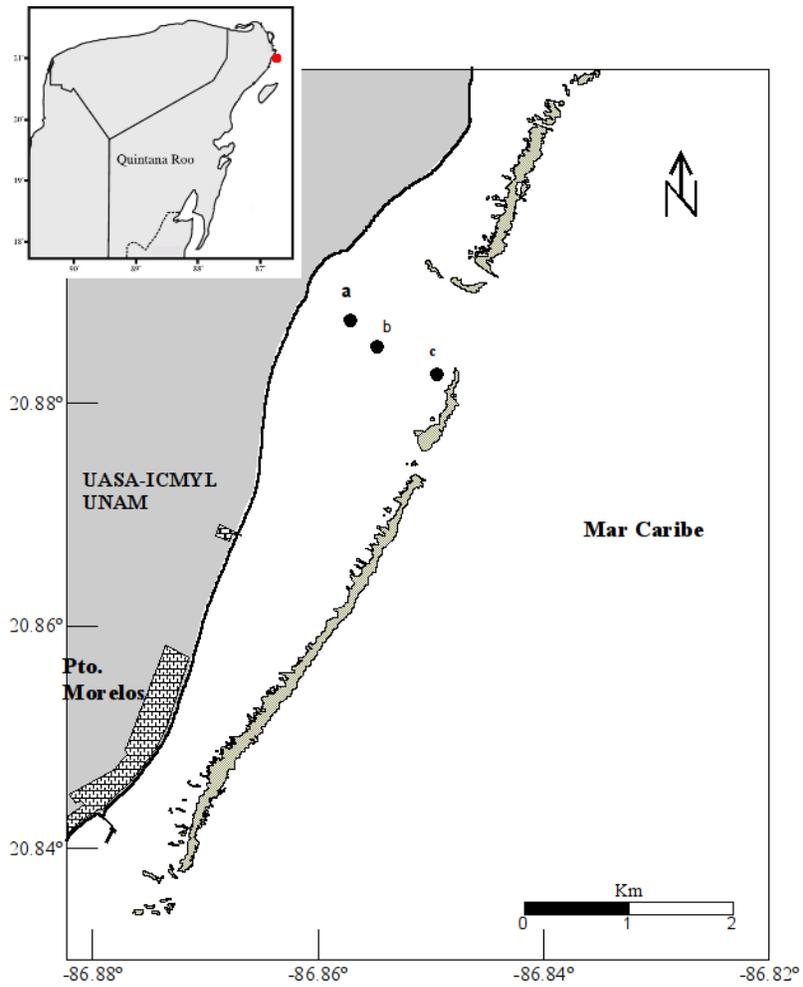


Figura 3. Mapa de los sitios muestreados en el Parque Nacional Arrecifes de Puerto Morelos. a) Ojo de Agua Norte (OAN), b) Laguna Arrecifal y c) Arrecife Posterior.

El OAN es una fractura longitudinal de aproximadamente ~4 m, la Laguna Arrecifal se encuentra a 30 m de distancia del OAN y el Arrecife Posterior cercano a la Bocana Grande con características ecológicas distintas (Figura 4).

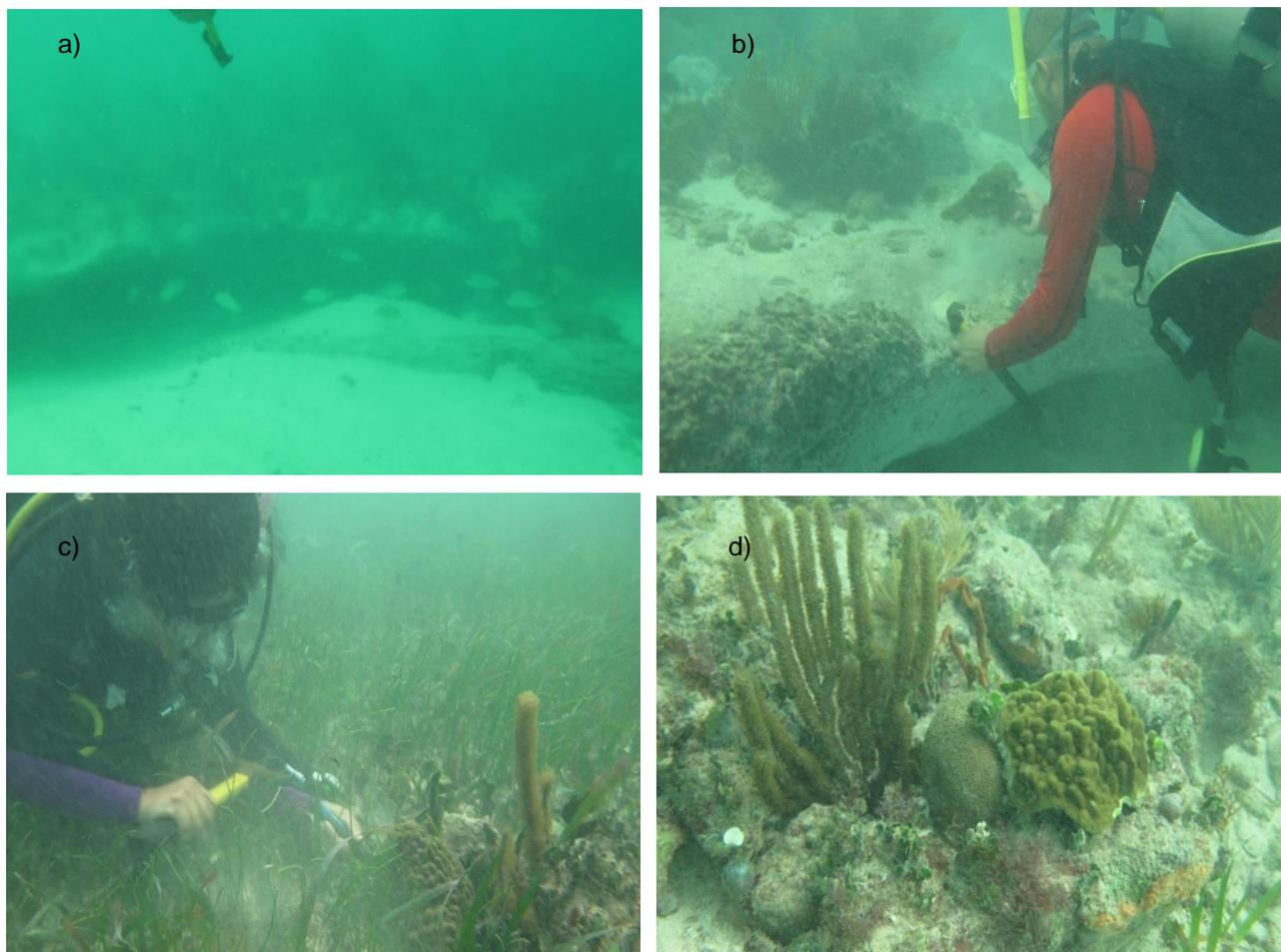


Figura 4. Fotografías de los sitios muestreados. a) Vista frontal del OAN, b) OAN, c) Laguna Arrecifal y d) Arrecife Posterior.

Características esclerocronológicas

Para la obtención de muestras se realizó en noviembre de 2012 y se extrajeron colonias de *Porites astreoides* de cada zona de muestreo, la colecta fue aleatoria. Mediante cincel y martillo se obtuvieron catorce colonias: cinco del OAN, cinco de la laguna arrecifal y cuatro del arrecife, todas a la profundidad de 5 m.

Las colonias se sometieron a un proceso de secado a medio secaron y de cada colonia se sacaron lajas de ~7 mm de grosor del eje de central de crecimiento con una sierra de filo diamantado. Estas lajas fueron radiografiadas con una cuña de aragonita de *Tridacna maxima* como estándar para obtener valores de densidad absoluta de las lajas (Carricart- Ganivet y Barnes, 2007), con un equipo GE Hungary Rt. Medical Systems, Modelo Legend 210/9030 Remote Control Table a una altura de 1.85 m, posteriormente las imágenes de las radiografías fueron digitalizadas con Direct View Cr Cassette with PQ Screen.

Las imágenes obtenidas fueron radiografiadas y digitalizadas fueron corregidas digitalmente con el método propuesto por Duprey *et al.* (2012), el cual consiste en corregir el efecto tacón (responsable del gradiente de intensidad de irradiación a lo largo del eje ánodo-cátodo) mediante el método de interpolación kriging que permite tener mediciones confiables de densidad óptica. La tasa de extensión esquelética (cm año^{-1}) y densidad esquelética (g cm^3) se obtuvieron mediante el programa de procesamiento digital de imágenes denominado "Image J", estas variables se midieron a lo largo del eje de crecimiento con el método propuesto por Carricart-Ganivet y Barnes (2007); para tener el promedio de densidad y la tasa de extensión anual. La tasa de calcificación es el producto de extensión anual y el promedio de la densidad ($\text{g CaCO}_3 \text{ cm}^{-3}$). Adicionalmente, se midió la longitud, ancho y grosor de cada laja radiografiada, así como la relación longitud-anchura (Carricart-Ganivet *et al.*, 2007), mediante un vernier analógico. Se midió el grosor de tejido vivo de cada laja radiografiada (Barnes y Lough, 1993).

Las lajas obtenidas se encuentran en resguardo en la colección del Laboratorio de Esclerocronología de Corales Arrecifales de la Unidad Académica de Sistemas Arrecifales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología.

Caracterización de variables ambientales

Para la caracterización del área de estudio se solicitó a la estación meteorológica de Puerto Morelos al Servicio Académico de Monitoreo Meteorológico y Oceanográfico (SAMMO) la información de los niveles de marea en el transcurso de este estudio (desde el 27 de febrero de 2014 hasta el 05 de junio de 2014).

Los datos de temperatura se utilizaron tres *termógrafos Hobo Data Loggers Pendant temp/light* para cada zona de muestreo con intervalo de muestro de 15 minutos en el periodo del 27 de febrero al 05 de junio de 2014.

Los datos de pH y salinidad fueron tomados con un termistor CTDdiver (Schlumberger), cada 5 minutos en el periodo del 04 de febrero al 22 de marzo de 2014, del ojo de agua "Pargos".

Análisis De Datos

Los datos obtenidos se les realizó un tratamiento estadístico de ANOVA, seguido de una prueba de comparaciones múltiples de Tukey para determinar las diferencias en las características esclerocronológicas de *P. astreoides* creciendo en los distintos sitios, así como para los registros de la temperatura. Además, se realizó un análisis de regresión lineal para determinar la relación de dichas características. Todos los análisis estadísticos fueron realizados usando R v. 3.2.1.

Los datos de temperaturas, mareas, salinidad y pH fueron analizados mediante el análisis de Fourier (González, 1997), diseñada para el análisis de series de tiempo estacionarias datos lineales y útil para determinar las periodicidades predominantes en el dominio frecuencia con el software Matlab r2015a. Para determinar el tiempo durante el cual el ojo de agua emana agua diluida o apertura, se realizó una correlación cruzada de las variables de mareas, temperatura, salinidad y pH.

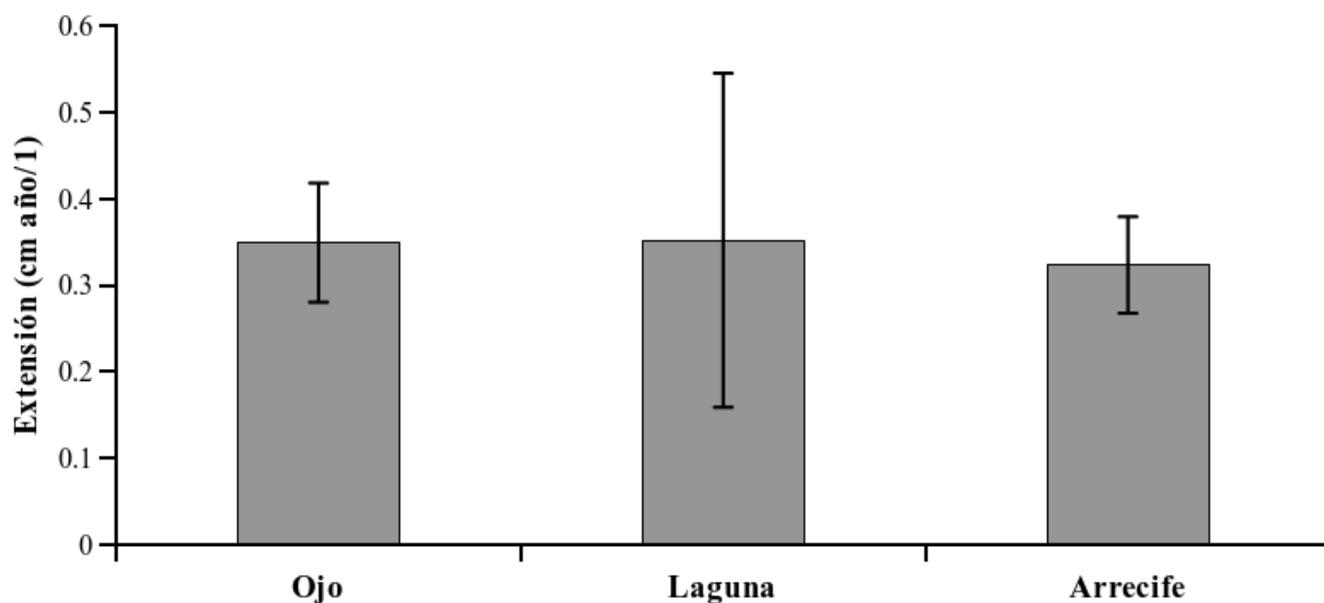
Resultados

Características esclerocronológicas de *Porites astreoides*

De las 14 colonias colectadas de *Porites astreoides*, se radiografiaron 29 lajas, 10 del OAN, 11 de la laguna y 8 del arrecife. De las cuales dos provenientes de la laguna no se utilizaron porque no se distinguían las bandas de alta y baja densidad.

Tasa de extensión anual.

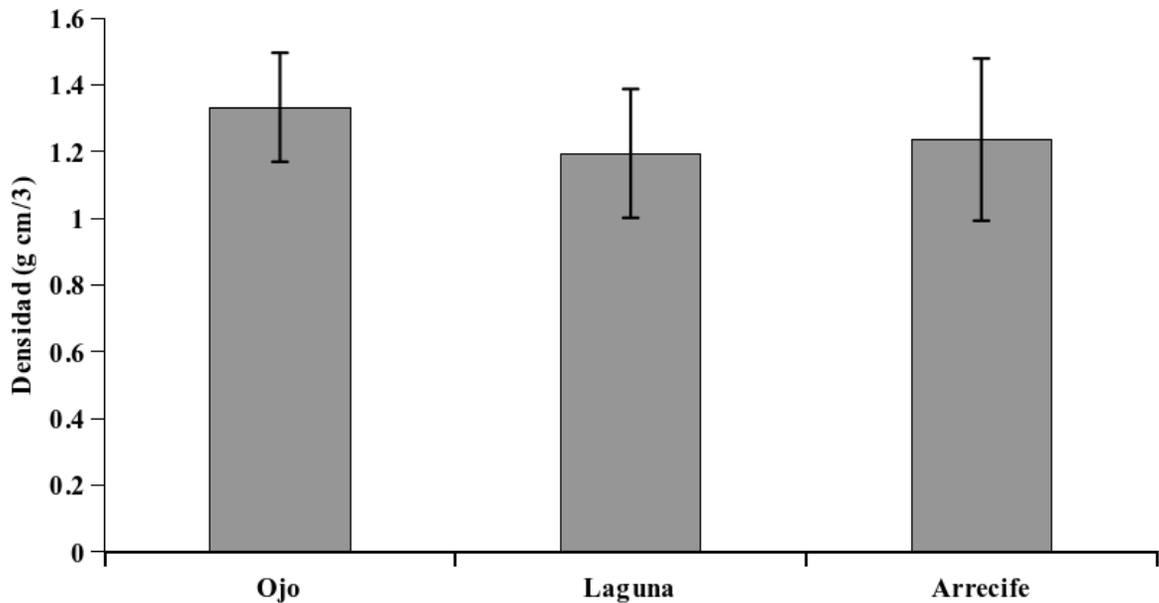
Se registró el mayor valor promedio en la laguna, seguido del ojo y el arrecife (0.35 ± 0.19 , 0.34 ± 0.06 y 0.32 ± 0.05 cm año⁻¹, respectivamente), sin mostrar diferencias significativas entre los sitios con un ANOVA de una vía ($F=0.47$, $p=0.72$). Gráfica 1.



Gráfica 1. Tasa de extensión anual en los tres sitios las barras de error representan la desviación estándar.

Densidad media anual del esqueleto

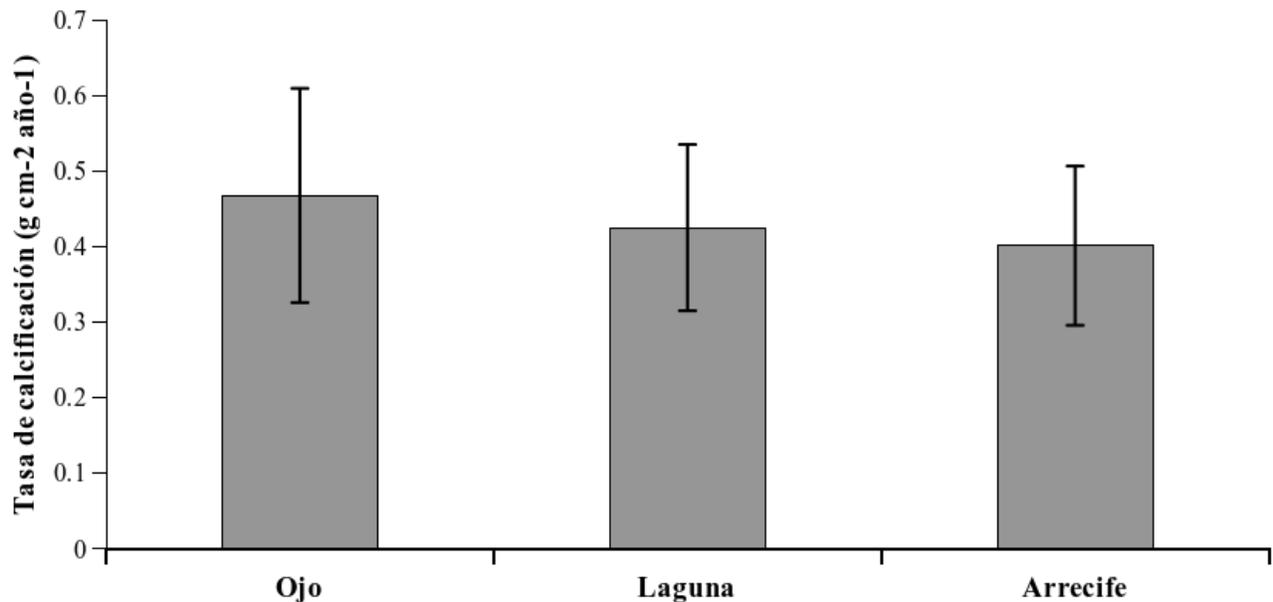
El mayor valor fue en ojo, seguido de arrecife y laguna (1.33 ± 0.16 , 1.23 ± 0.24 y 1.19 ± 0.19 g CaCO₃ cm⁻³, respectivamente). No se detectaron diferencias significativas entre los sitios con un ANOVA de una vía ($F=0.62$, $p=0.44$). Gráfica 2.



Gráfica 2. Gráfica de los niveles de marea y temperaturas del OAN y Laguna durante el periodo de mayo a junio de 2014.

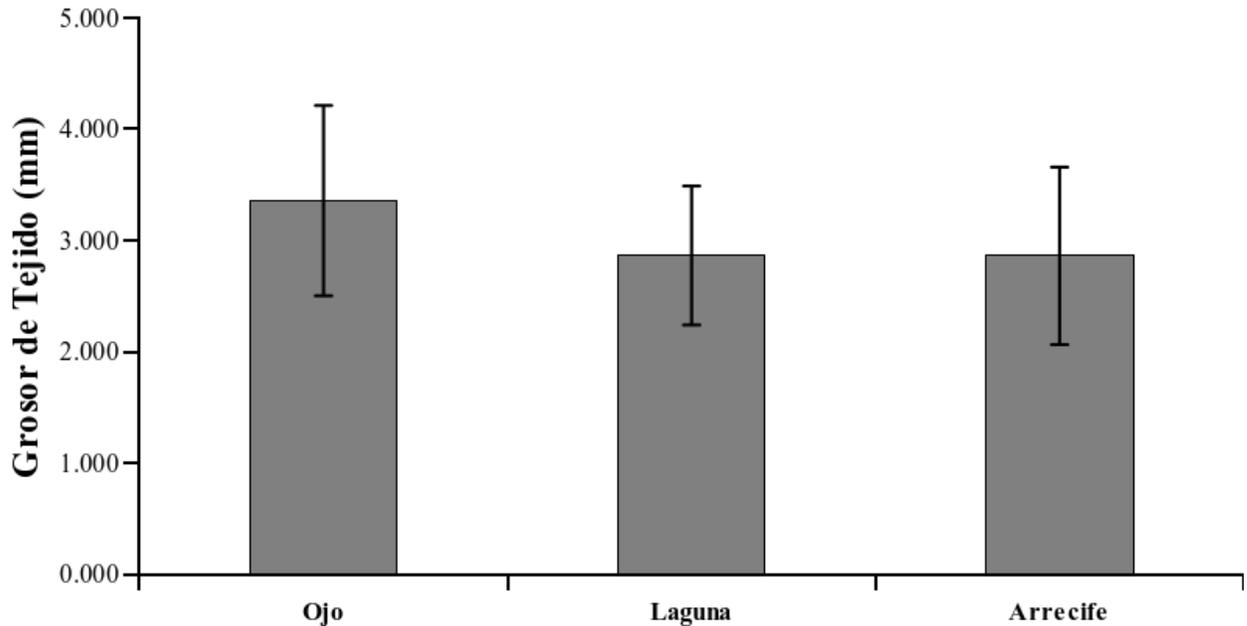
Tasa de calcificación anual.

El mayor valor fue en el ojo, seguido de la laguna y del arrecife (0.46 ± 0.14 , 0.42 ± 0.11 y 0.40 ± 0.10 g CaCO₃ cm⁻² año⁻¹, respectivamente). No se detectaron diferencias significativas entre los sitios con un ANOVA de una vía ($F=0.73$, $p=0.41$). Gráfica 3.



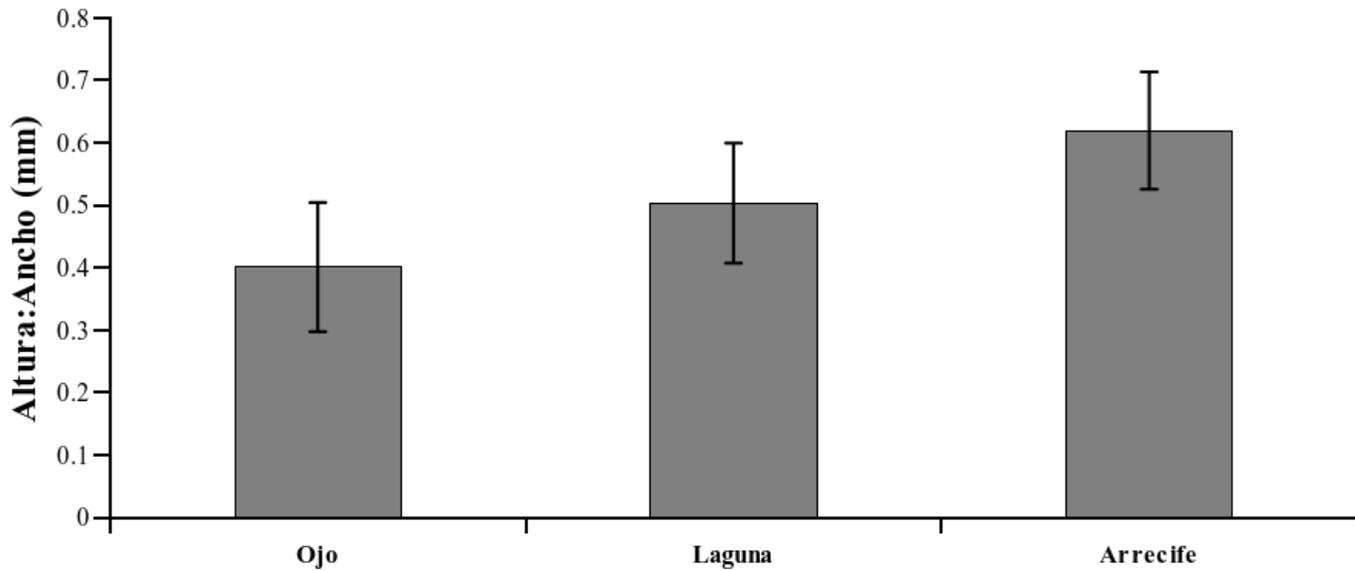
Gráfica 3. Tasa de calcificación anual en los tres sitios, las barras de error representan la desviación estándar.

El grosor promedio del tejido de las colonias de *Porites astreoides* es de 3.20 ± 0.46 (mm), presentaron diferencias significativas (ANOVA una vía, $F=4.5$, $p=0.02$) entre los sitios. Al realizar una prueba *post hoc* de Tukey HSD mostró diferencias entre el OAN y la laguna así como entre el arrecife y la laguna. Gráfica 4.



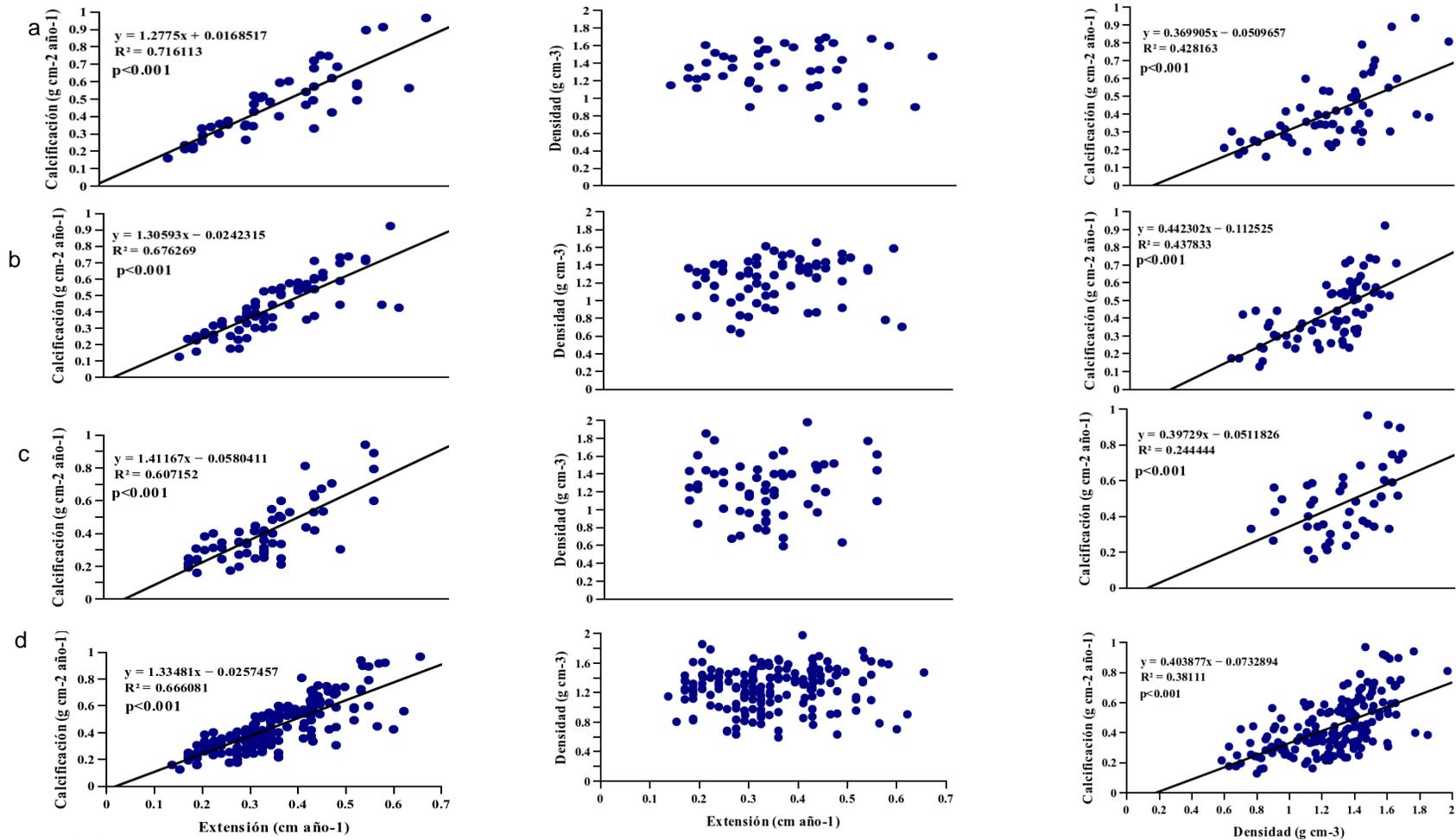
Gráfica 4. Grosor de tejido en los tres sitios, las barras de error representan la desviación estándar.

En cuanto a la morfología de las colonias, se encontraron diferencias significativas en la relación altura-ancho entre los sitios (ANOVA de una vía $F=5.4$, $p=0.02$), al realizar una prueba *post hoc* de Tukey HSD mostró diferencias entre el OAN y el arrecife (0.40 ± 0.10 y 0.62 ± 0.09 cm, respectivamente). Se encontró una tendencia que podría indicar que el tamaño de estos organismos del eje de crecimiento es menor en la zona de muestreo en el OAN. Gráfica 5.



Gráfica 5. Medidas morfométricas de las colonias, las barras de error representan la desviación estándar.

Respecto a las características esclerocronológicas de los tres sitios de muestreo se observó una relación entre la calcificación y la extensión de $r^2=0.66$, tenido una mayor relación en l OAN, seguido de la laguna y el arrecife ($r^2=0.71$, 0.67 , 0.60 , respectivamente). Mientras que, para la densidad y la tasa de extensión no se encontró relación y para el caso de la calcificación y la densidad se encontró una relación débil de $r^2=0.38$ para los tres sitios. Gráfica 6.



Gráfica 6. Representa la regresión lineal entre las principales características esclerocronológicas en los tres sitios a) OAN, b) la Laguna, c) el Arrecife y d) los tres sitios. la primera columna muestra la extensión vs calcificación, la segunda columna es para extensión vs densidad y la tercer columna es para densidad y calcificación. Las líneas de regresión muestran donde los parámetros están relacionados significativamente.

Caracterización ambiental

Las temperaturas registradas en la Laguna y en el Arrecife tienen una estrecha correlación a diferencia de las temperaturas registradas en el OAN, donde fueron menores hasta por más de un grado centígrado (Gráfica 7). En el transcurso de 24 horas se puede observar las diferencias significativas entre la Laguna y el Arrecife comparado con el OAN (Gráfica 8). (Figura 11), se ve de forma más clara las semejanzas entre las condiciones entre temperaturas en la laguna y el arrecife, así como las diferencias entre estos dos sitios con el OAN.

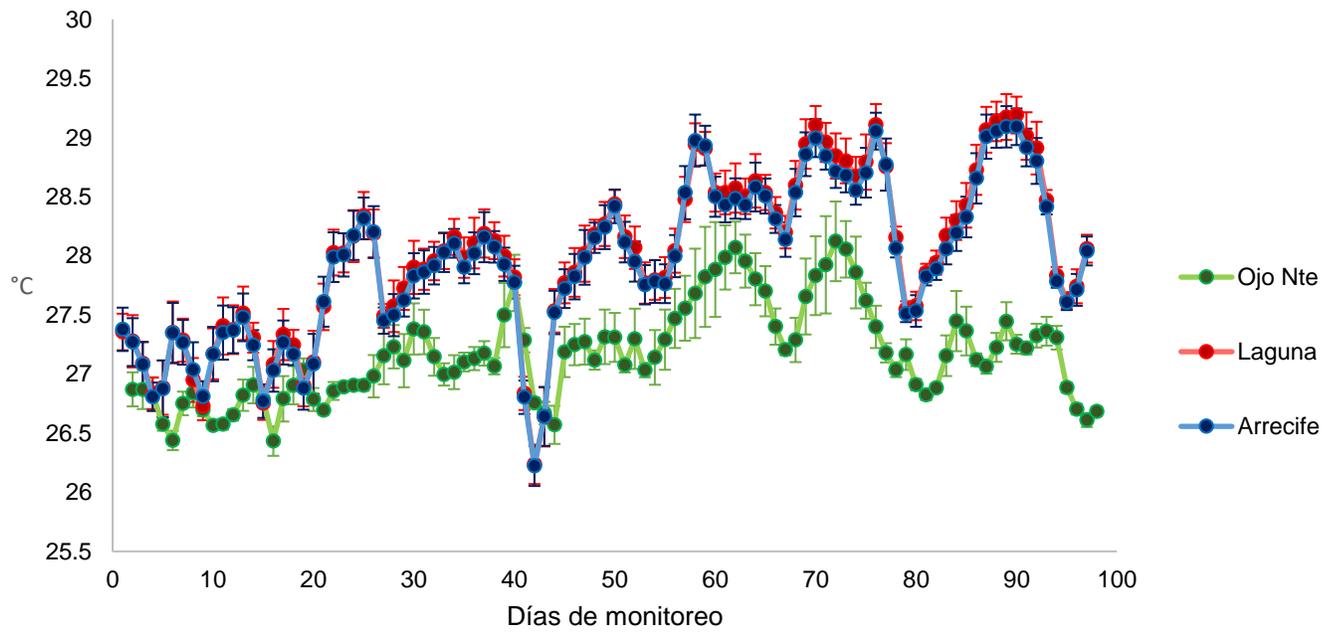
Al realizar el análisis de Fourier para determinar las frecuencias de los principales parámetros ambientales en los tres sitios se encontró que para la temperatura los picos de alta frecuencia más prominentes en el OAN son de 12.53 y 23.89 horas, para la Laguna y el Arrecife de 23.97 horas; mientras que las bajas frecuencias son de 12.53 y 25.87 días para el OAN en el periodo de febrero a julio de 2014. Las altas frecuencias para salinidad y pH para el OAN son de 11.92 y 12.56 horas, respectivamente y de baja frecuencia de 52.71 y 52.54 horas para salinidad y pH (Tabla 1).

El tiempo durante el cual el OAN emana agua continental, para el periodo de febrero a julio de 2014 con relación a la temperatura y marea fue de 44% del tiempo muestreado. Por otra parte, se determinó que cuando el nivel de marea alta tiene un promedio de 23.64 mm el OAN no emite flujo; mientras que cuando el nivel de marea alta tiene un promedio de 10.04 mm se mantiene con flujo (Gráfica 10).

Tabla 1. Tabla de periodo en horas para los diferentes parámetros en los tres sitios

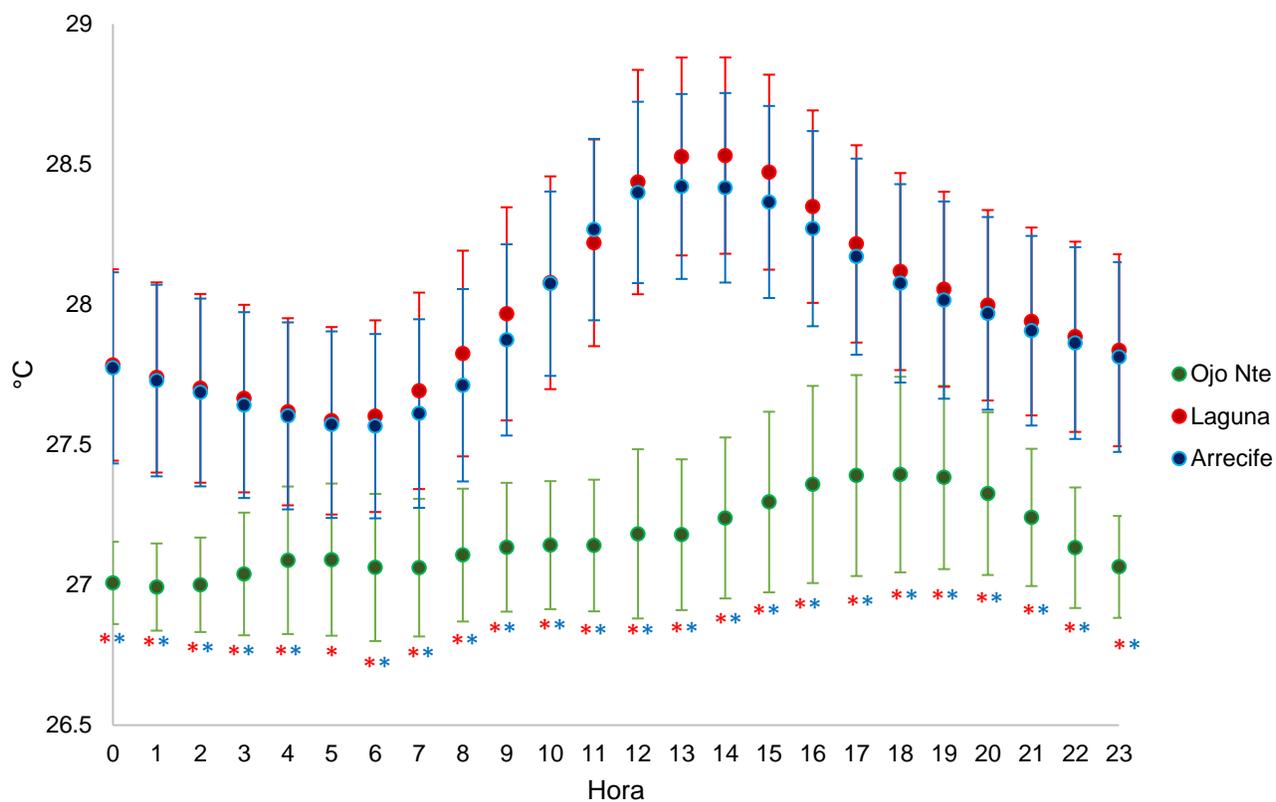
Sitio/Parámetro	Ojo de Agua	Laguna	Arrecife
Temperatura	12/23.89	23.97	23.97
Marea	12.4	12.4	12.4
Salinidad	11.99	-	-
pH	12.56	-	-

Temperaturas a lo largo del estudio

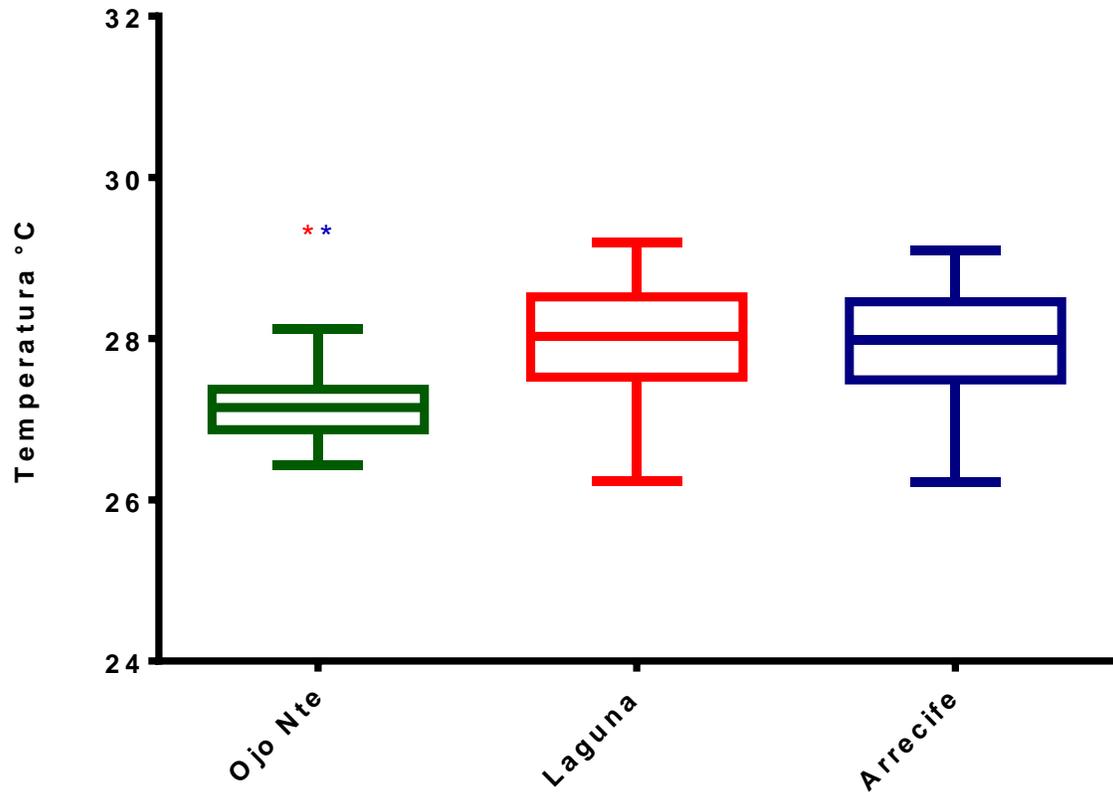


Gráfica 7. Temperatura del agua registrados con Hobos, día a día en intervalos de 15 minutos en cada sitio de muestreo durante el periodo del 27 de febrero al 05 de junio de 2014 (barras de error = desviación estándar).

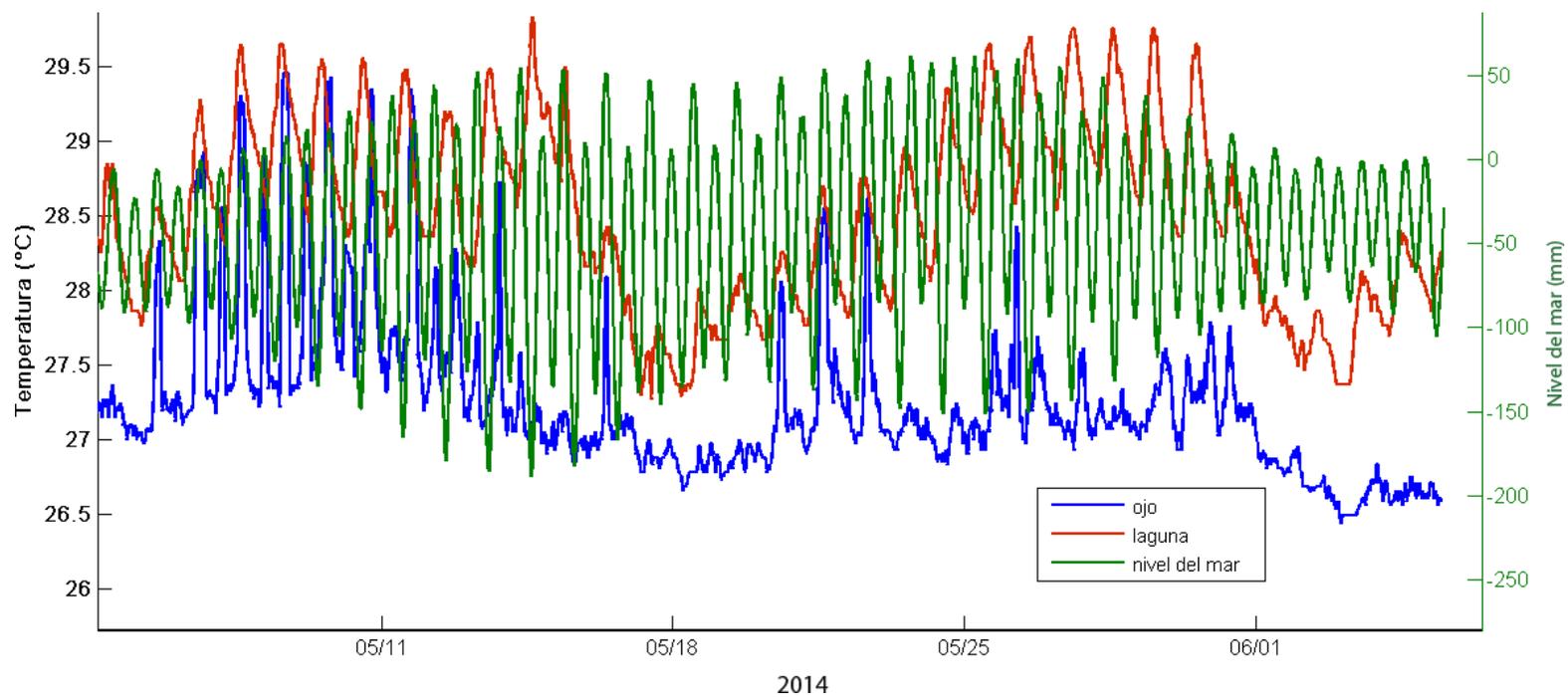
Temperaturas medias a lo largo del día



Gráfica 8. Temperatura del agua en cada sitio de muestreo de acuerdo con el horario, periodo del 27 de febrero al 05 de junio de 2014, intervalos de 15 minutos ANOVA seguida de una prueba de Tukey (* $p < 0.05$), desviación estándar por horario. (*Diferencia significativa con respecto a laguna * diferencia significativa con respecto al arrecife).



Gráfica 9. Temperaturas medias del agua por día registradas entre el 28 de febrero de 2014 hasta al 4 de junio de 2014, ANOVA seguida de una prueba de Tukey * $p < 0.05$. (*Diferencia significativa con respecto a laguna * diferencia significativa con respecto al arrecife).



Gráfica 10. Gráfica de los niveles de marea y temperaturas del OAN y Laguna durante el periodo de mayo a junio de 2014.

Discusión

Las características esclerocronológicas de densidad, tasa de extensión anual y tasa de calcificación entre los tres sitios muestreados no tuvieron diferencias significativas, coincidiendo con el estudio comparativo entre diferentes sitios con condiciones óptimas y subóptimas de Elizalde-Rendon *et al.* (2010). Además, estas características esclerocronológicas encontradas en este estudio se encuentran dentro de los valores reportados por otros autores para *P. astreoides* en algunos arrecifes distribuidos en el Caribe (Tabla 2).

Las tasas de extensión anual para los tres sitios son cercanos a lo reportado por Elizalde-Rendon *et al.* (2010) para la localidad de Cuba, así como por Hugues y Jackson (1985) en Jamaica. No obstante, los valores del OAN (3.4 ± 0.68 mm año⁻¹), en este estudio son mayores a los reportados por Crook *et al.* (2013) en el mismo sitio (1.19 ± 0.07 mm año⁻¹). Mientras que, para otras zonas del Caribe Mexicano (Cruz-Ortega, 2013), los valores de extensión anual son mayores a los encontrados en este estudio, pudiéndose deber a las condiciones ambientales.

Los valores de densidad fueron mayores para el OAN (1.33 ± 0.16 g cm⁻³), mientras que Crook *et al.* (2013) para el mismo sitio determinó valores de 1.1 g cm⁻³. La metodología utilizada por Crook *et al.* (2013), fue mediante tomografías computarizadas, mientras que en este estudio se realizó mediante la técnica de densitometría óptica y la corrección digital propuesta por Duprey *et al.* (2012).

La tasa de calcificación fue ligeramente mayor en el OAN, seguido de la Laguna y el Arrecife; que podría ser explicado por lo encontrado por Lough y Barnes (2000), donde hubo un ligero incremento en la calcificación en *Porites* sp. en un rango de bajas temperaturas. Mientras que, Carricart *et al.* (2012), determinaron que *Porites* sp. es sensible al incremento de la temperatura.

La tasa de calcificación tiene mayor variabilidad en el OAN respecto a los otros dos sitios podría ser explicado por la capacidad de absorber mayor cantidad de luz y presentar mayores tasas de

calcificación instantáneas que podría ayudar a aminorar las condiciones en las que se encuentran (Galindo, 2014). Mientras que Crook *et al.* (2013), encontraron una disminución en la tasa de calcificación en *P. astreoides* cerca del ojo de agua “Pargos” atribuyéndole al estado de saturación de Ω_{ara} .

El grosor de tejido en el OAN fue la característica esclerocronológica con diferencias significativas respecto a los otros sitios, contrasta porque hay reportes que indican que mayores grosores de tejido representan mejores condiciones ambientales (Cruz-Piñón *et al.*, 2003).

Respecto a las medidas de largo y ancho, se encontró una disminución de la altura en los corales del OAN en relación con los del arrecife, lo cual coincide con los resultados obtenidos por Crook *et al.* (2012). La morfología de las colonias en el OAN podría estar relacionado con tiempos de vidas cortos y por estar en ambientes poco favorables (Vermeij *et al.*, 2007).

La variación encontrada en la tasa de calcificación esta explicada por la tasa de extensión (68%), coincidentemente con la estrategia de crecimiento del género *Porites*, donde los recursos energéticos son invertidos en extensión esquelética (Carricart-Ganivet 2004, 2007; Elizalde-Rendon *et al.*, 2010; Carricart *et al.*, 2012). Mientras, que la relación inversa entre la densidad y extensión lineal encontrada en los tres sitios es coincidente con lo encontrado por Lough y Barnes (2000) y Elizalde-Rendon *et al.* (2010).

El género *Porites* tiene una alta plasticidad que les permite adaptarse a una gran cantidad de condiciones ambientales durante distintas etapas de su vida (Smith *et al.*, 2007 Goodbody-Gringley *et al.*, 2021). Se ha sugerido que las condiciones ambientales probablemente ejercen una influencia selectiva con las estrategias de crecimiento y guiando la evolución, diversidad, distribución y abundancia de los arrecifes de coral (Carricart-Ganivet 2004, 2007). Se sugiere que las colonias del OAN han estado bajo eventos frecuentes de estrés que podrían ser una razón por la cual no se presentaron diferencias en las características esclerocronológicas como lo mencionan Carricart-Ganivet *et al.* (2012).

Tal como lo señalan un gran número de estudios (v.g., Marubi *et al.*, 2001; Marshall y Clode, 2004; Rodolfo-Metalpa *et al.*, 2008; Goffredo *et al.*, 2009), el principal parámetro que influye en el crecimiento y la supervivencia de los corales es la temperatura, por lo que, la descarga de aguas continentales subterráneas representa un factor reductor de la temperatura. La mayoría de los trabajos reportados para *P. astreoides* indican una disminución de las características esclerocronológicas con el aumento de la temperatura (v.g. Manzello *et al.*, 2015; Schoepf *et al.*, 2015; Camp *et al.*, 2016; Okazaki *et al.*, 2017), no obstante, la variabilidad de temperaturas encontrada en este estudio podría relacionarse con las características esclerocronológicas en el OAN.

Derivado del análisis de frecuencia de los datos de temperatura de los tres sitios encontramos que las mayores frecuencias están representadas por ciclos de ~12 y 24 horas que está relacionado directamente con el régimen de mareas el cual es semi-diurno para la zona (Coronado *et al.*, 2007). Es conocido que existe una relación entre el nivel del mar y las descargas de agua subterránea como en los ojos de agua, en los cuales el nivel del agua subterránea responde directamente al cambio de nivel de marea (Valle-Levinson *et al.*, 2011; Knee y Paytan, 2011; Expósito-Díaz *et al.* 2013; Parra *et al.*, 2015).

De acuerdo con los valores de temperatura de la laguna, OAN y nivel de marea se obtuvo para el periodo muestreado de febrero a junio de 2014 que el 44% del tiempo el OAN se encuentra con emanación de agua continental y el tiempo restante sin flujo de agua con base en análisis espectral (FFT). Lo que contrasta con los resultados de Iglesias-Prieto *et al.* (2014), donde muestran que el 19.5% del tiempo el ojo de agua “Pargos” se encuentra abierto.

El tiempo que el OAN no emite flujo de agua continental es del 56% que podría representar una oportunidad a los corales para recuperarse porque las condiciones son parecidas a las de la laguna/arrecife. Además. Iglesias-Prieto *et al.* (2014), indican que la dispersión de la luz en los ojos de agua debido a la mezcla de agua de diferentes densidades se incrementa en un 30%.

Este estudio sugiere la capacidad de adaptación de la especie *Porites astreoides* ante el

cambio climático. Pero, también ayuda al entendimiento de como son las características de crecimiento en sitios naturales como los ojos de agua que podrían ser denominados como estados “alternativos de desarrollo” (Schoepf *et al.*, 2023), y no solo como arrecifes marginales (Perry y Larcombe, 2003).

No obstante, en el estudio no se consideraron los nutrientes que podrían tener un efecto en el crecimiento de los corales. Las altas concentraciones de nutrientes encontrados en las descargas de agua subterránea por Carruthers *et. al.* (2005) y por Herrera (1996) nos llevaría a pensar que los parámetros de crecimiento se podrían verse afectados como lo reportado en múltiples estudios (vg., Tomascik y Sander, 1987; Kleypas *et al.*, 1999; Langdon y Atkinson, 2005; Silverman *et al.*, 2007; Olivo *et al.*, 2013;), no obstante, algunos estudios (vg., Jokiel *et al.*, 2008, Connolly *et al.*, 2012;), indican que altas concentraciones de nutrientes pueden proveer recursos energéticos que compensen los efectos deletéreos.

Conclusiones

Las características esclerocronológicas (extensión esquelética, densidad y tasa de calcificación) de *P. astreoides* no presentaron diferencias significativas entre los tres sitios de muestreo, aunque los sitios de la Laguna y el Arrecife presentan una mayor similitud entre ellos.

La variabilidad de la temperatura, salinidad y pH está regulada por el nivel de mareas en el OAN. Para el periodo muestreado de febrero a julio de 2014 el tiempo que emana agua continental del OAN fue de 44%.

Este estudio proporciona información valiosa sobre las características esclerocronológicas de *Porites astreoides* en diferentes condiciones ambientales.

Perspectivas y recomendaciones

Es importante considerar en futuros estudios de los ambientes de los ojos de agua un análisis de los nutrientes que resultan de la descarga de agua dulce al agua de mar, además de una serie mayor de salinidad, pH, temperatura. También se sugiere conocer los tipos de simbiontes asociados que permiten la supervivencia en estos estados alternativos de desarrollo.

Tabla 2. Valores de extensión esquelética, tasa de calcificación y densidad promedio para diferentes sitios para la especie *Porites astreoides*.

Autores	Año	Sitio	Extensión esquelética (mm año⁻¹)	Densidad(g cm⁻³)	Tasa de calcificación(g cm⁻² año⁻¹)
Elizalde-Rendón <i>et al.</i>	2010	Promedio	3.67 ± 0.65	1.49 ± 0.16	0.55 ± 0.12
		Golfo de México (Sistema Arrecifal Veracruzano)	3.69 ± 1.08	1.42 ± 0.19	0.52 ± 0.16
		Caribe Mexicano (Mahahual, QuintanaRoo)	4.33 ± 1.22	1.62 ± 0.21	0.71 ± 0.23
		Costa Norte de Cuba (Golfo de Guanahacabibes)	3.53 ± 1.19	1.71 ± 0.16	0.61 ± 0.22
Cruz-Ortega	2013	Mahahual	4.9 ± 0.10	1.71 ± 0.12	0.80 ± 0.06
		Banco Chinchorro	4.9 ± 0.72	1.62 ± 0.09	0.81 ± 0.07
Hugues y Jackson	1985	Jamaica	3.2	1.1	0.352
			2.8	1.1	0.308
Crook <i>et al.</i>	2013	Puerto Morelos, Ojo	1.19 ± 0.07	1.05	0.2
		Laguna	2.29 ± 0.9	1.20	0.35
		Arrecife	3.3 ± 1.2	1.6	0.48
Chávez-Barrera (este estudio)		Puerto Morelos, Ojo Norte	3.4 ± 0.68	1.33 ± 0.16	0.46 ± 0.14
		Laguna	3.5 ± 1.19	1.19 ± 0.19	0.42 ± 0.11
		Arrecife	3.2 ± 0.55	1.23 ± 0.24	0.40 ± 0.10

Literatura citada

- Albright, R., Mason, B., y Langdon, C. 2008. "Effect of aragonite saturation state on settlement and post-settlement growth of *Porites astreoides* larvae." *Coral Reefs* 27(3): 485–490. <https://doi.org/10.1007/s00338-008-0392-5>
- Allemand, D., Ferrier-Pagès, C., Furla, P., Houlbrèque, F., Puvarel, S., Stéphanie Reynaud, Éric Tambutté, Sylvie Tambutté, y Didier Zoccola. 2004. "Biomineralisation in Reef-Building Corals: From Molecular Mechanisms to Environmental Control." *Comptes Rendus Pale* 3: 453–67.
- Alvarez-Filip, L., Carricart-Ganivet, J.P., Horta-Puga, G. e Iglesias-Prieto, R. 2013. "Shifts in Coral-Assemblage Composition Do Not Ensure Persistence of Reef Functionality." *Scientific Reports* 3 (December). doi:10.1038/srep03486.
- Alvarez-Filip, L., Nicholas K. Dulvy, Côté, I.M., Watkinson, A. R. y Gill, J.A. 2011. "Coral Identity Underpins Architectural Complexity on Caribbean Reefs." *Ecological Applications* 21 (6): 2223–31.
- Aranda Cirerol, N., Herrera-Silveira, J.A. y Comín, F.A. 2006. "Nutrient Water Quality in a Tropical Coastal Zone with Groundwater Discharge, Northwest Yucatan, Mexico." *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 68 (3): 445–54.
- Back, William. 1985. "Part III: Hydrogeology of the Yucatan." *Geology and Hydrogeology of the Yucatan and Quaternary. Geology of Northeastern Yucatan Peninsula*. Ed. W. C. Ward (Eds.). New Orleans Geological Society, Nueva Orleans. pp. 99-124.
- Barnes, D. J., y Lough, J. M. 1993. "On the Nature and Causes of Density Banding in Massive Coral Skeletons." *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 167 (1): 91–108. doi:10.1016/0022-0981(93)90186-R.
- Bauer-Gottwein, P., Gondwe, RN, Charvet, G., Marín, L.E., Rebolledo-Vieyra, Mario y Merediz-Alonso, G. 2011. "Review: The Yucatán Peninsula Karst Aquifer, Mexico." *Hydrogeology Journal* 19 (3): 507–24.
- Brakel, Willem H. 1977. "Corallite Variation in *Porites* and the Species Problem in Corals." *Proceedings of the Third International Coral Reef Symposium* 1:457–62.
- Bove, C. B., Ries, J.B., Davies, S.W., Westfield, I.T., Umbanhowar, J., y Castillo, K. D. 2019. "Common Caribbean corals exhibit highly variable responses to future acidification and warming". *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 286(1900). <https://doi.org/10.1098/rspb.2018.2840>

- Bruno, J.F., y Selig, E.R. 2007. "Regional decline of coral cover in the Indo-Pacific: Timing, extent, and subregional comparisons". *PLoS ONE* 2(8): e711. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0000711>
- Camp, E. F., Smith, D.J., Evenhuis, C., Enochs, I., Manzello, D., Woodcock, S., y Suggett, D.J. 2016. "Acclimatization to high-variance habitats does not enhance physiological tolerance of two key Caribbean corals to future temperature and pH". *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 283(1831):1-10. <https://doi.org/10.1098/rspb.2016.0442>
- Carricart-Ganivet, J. P., y Barnes, D. J. 2007. "Densitometry from digitized images of X-radiographs: Methodology for measurement of coral skeletal density". *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 344(1): 67–72. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2006.12.018>
- Carricart-Ganivet, J. P., y Merino, M. 2001. "Growth Responses Of The Reef-Building Coral *Montastraea Annularis* Along A Gradient Of Continental Influence In The Southern Gulf Of Mexico". *Bulletin Of Marine Science* 68(1):133-146
- Carricart-Ganivet, J.P. 2011. "Coral Skeletal Extension Rate: An Environmental Signal or a Subjectb Inaccuracies?" *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 405: 73–79.
- Carricart-Ganivet, J.P., Cabanillas-Terán, N., Cruz-Ortega, I., y Blanchon, P. 2012. "Sensitivity of calcification to thermal stress varies among genera of massive reef-building corals". *PLoS ONE* 7(3). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0032859>
- Carricart-Ganivet, J.P., Lough, J.M. y Barnes, D.J. 2007. "Growth and Luminescence Characteristics in Skeletons of Massive *Porites* from a Depth Gradient in the Central Great Barrier Reef." *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 351: 27–36.
- Carruthers, T.J.B., Van Tussenbroek, B.I y Dennison W.C. 2005. "Influence of Submarine Springs and Wastewater on Nutrient Dynamics of Caribbean Seagrass Meadows." *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 64: 191–99.
- Cesar, H., y Chong, C. K. 2003." WorldFish Center | Economic Valuation and Policy Priorities for Sustainable Management of Coral Reefs Economic Valuation and Socioeconomics of Coral Reefs: Methodological Issues and Three Case Studies 1". World Fish Center. Penang Malaysia.
- Chornesky, E. A., y Peters, E.C. 1987. "Sexual Reproduction And Colony Growth In The Scleractinian Coral *Porites Astreoides*". *The Biological Bulletin* 172(2): 161–177. <https://doi.org/10.2307/1541790>
- Coffroth, M. A., y Santos, S. R. 2005. "Genetic diversity of symbiotic dinoflagellates in the genus *Symbiodinium*". *Protist* 156(1): 19–34. <https://doi.org/10.1016/j.protis.2005.02.004>
- Connolly, S.R., Lopez-Yglesias, M.A. y Anthony, K.R.N. 2012. "Food Availability Promotes Rapid

- Recovery from Thermal Stress in a Scleractinian Coral.” *Coral Reefs* 31 (4): 951–60.
- Coronado, C., Candela, J., Iglesias-Prieto, R., Sheinbaum, J., López, M., y Ocampo-Torres, F. J. 2007. “On the circulation in the Puerto Morelos fringing reef lagoon”. *Coral Reefs* 26(1): 149–163. <https://doi.org/10.1007/s00338-006-0175-9>
- Crook, E. D., Cohen, A. L., Rebolledo-Vieyra, M., Hernandez, L., y Paytan, A. 2013. “Reduced calcification and lack of acclimatization by coral colonies growing in areas of persistent natural acidification”. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 110(27): 11044–11049. <https://doi.org/10.1073/pnas.1301589110>
- Crook, E.D., Potts, D., Rebolledo-Vieyra, M., Hernandez, L. y Paytan, A. 2012. “Calcifying Coral Abundance near Low-pH Springs: Implications for Future Ocean Acidification.” *Coral Reefs* 31 (1): 239–45. doi:10.1007/s00338-011-0839-y.
- Cruz-Ortega, I.A. 2013. “Tasa de Calcificación de los corales del género *Monstrastrea* y *Porites* astreoides en función de la Temperatura Superficial del Océano y el Estado de Saturación de la Aragonita en el Caribe Mexicano”. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Cruz-Piñón, G., Carricart-Ganivet, J. P., y Espinoza-Avalos, J. 2003. “Monthly skeletal extension rates of the hermatypic corals *Montastraea annularis* and *Montastraea faveolata*: Biological and environmental controls”. *Marine Biology* 143(3): 491–500. <https://doi.org/10.1007/s00227-003-1127-3>
- Dodge, R. E, y Gilbert, T.R. 1984. “Chronology of Lead Pollution Contained in Banded Coral Skeletons.” *Marine Biology* 82: 9–13.
- Dodge, R.E, y Brass. G.W. 1984. “Skeletal Extension, Density and Calcification of The Reef Coral, *Montastrea Annularis*: St. Croix, U.S. Virgin Islands.” *Bulletin of Marine Science* 34: 288–307.
- Eagleson, R.G., Álvarez-Filip, L., y Lumsden, J. S. 2023. A Review of Research on the Mustard Hill Coral, *Porites astreoides*. *Diversity* 15(3). <https://doi.org/10.3390/d15030462>
- Edmunds, P.J. 2010. “Population biology of *Porites astreoides* and *Diploria strigosa* on a shallow Caribbean reef”. *Marine Ecology Progress Series* 418: 87–104. <https://doi.org/10.3354/meps08823>
- Expósito-Díaz, G., Monreal-Gómez, M.A., Valle-Levinson, A., y Salas-De-León, D.A. 2013. “Tidal variations of turbulence at a spring discharging to a tropical estuary”. *Geophysical Research Letters* 40(5): 898–903. <https://doi.org/10.1002/grl.50194>

- Fabricius, Katharina E. 2005. "Effects of Terrestrial Runoff on the Ecology of Corals and Coral Reefs: Review and Synthesis." *Marine Pollution Bulletin* 50: 125–46.
- Fadlallah, Y. H. 1983. "Sexual Reproduction, Development in Scleractinian Corals A Review and Larval Biology". *Coral Reefs* (Vol. 2).
- Foster, T., y Gilmour, J. 2018. "Reproduction of brooding corals at Scott Reef, Western Australia". *Matters* 4(7):1-9. <https://doi.org/10.19185/matters.201807000008>
- Gagnon, Alexander C. 2013. "Coral Calcification Feels the Acid." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 110: 1567–68.
- Galindo- Martínez, C.T. 2014. "Efecto de la temperatura y el omega de aragonita en la calcificación del coral escleractíneo: *Porites astreoides*". Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Gardner, T. A., Côté, I. M., Gill, J. A., Grant, A., y Watkinson, A. R. 2003. « Long-term region-wide declines in Caribbean corals". *Science* 301(5635): 958–960. <https://doi.org/10.1126/science.1086050>
- Gattuso, J-P, Frankignoulle, M., Bourge, I., Romaine, S. y Buddemeier. R.W. 1998. "Effect of Calcium Carbonate Saturation of Seawater on Coral Calcification." *Global and Planetary Change* 18: 37–46.
- Goffredo, S., Caroselli, E., Mattioli, G., Pignotti, E., Dubinsky, Z., y Zaccanti, F. 2009. Inferred level of calcification decreases along an increasing temperature gradient in a Mediterranean endemic coral. <http://www.apat.gov.it>
- González, G. 1997. "Series de Fourier, Transformadas de Fourier Y Aplicaciones." *Divulgaciones Matemáticas* 5 (1/2): 43–60.
- Goodbody-Gringley, G., Scucchia, F., Ju, R., Chequer, A., Einbinder, S., Martinez, S., Nativ, H., y Mass, T. 2021. Plasticity of *Porites astreoides* Early Life History Stages Suggests Mesophotic Coral Ecosystems Act as Refugia in Bermuda. *Frontiers in Marine Science* 8. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.702672>
- Goreau, T.F., y Wells, J. W. 1967. " The Shallow-Water Scleractinia of Jamaica: Revised List of Species and their Vertical Distribution Range". *Bulletin of Marine Science* 17(2):442-453.
- Green, D.H., Edmunds, P.J., y Carpenter, R.C. 2008. "Increasing relative abundance of *Porites astreoides* on Caribbean reefs mediated by an overall decline in coral cover". *Marine Ecology Progress Series* 359: 1–10. <https://doi.org/10.3354/meps07454>
- Grottoli, A.G., Rodrigues, L. J., y Palardy, J.E. 2006. "Heterotrophic plasticity and resilience in bleached

- corals". *Nature* 440(7088): 1186–1189. <https://doi.org/10.1038/nature04565>
- Guan, Y., Hohn, S., y Merico, A. 2015. "Suitable environmental ranges for potential Coral reef habitats in the tropical ocean". *PLoS ONE* 10(6). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0128831>
- Hallock, Pamela. 1988. "The Role of Nutrient Availability in Bioerosion: Consequences to Carbonate Buildups." *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 63: 275–91.
- Hennige, S. J., McGinley, M. P., Grottoli, A. G., y Warner, M. E. (2011). Photoinhibition of Symbiodinium spp. within the reef corals *Montastraea faveolata* and *Porites astreoides*: Implications for coral bleaching. *Marine Biology*, 158(11), 2515–2526. <https://doi.org/10.1007/s00227-011-1752-1>
- Hernández-Arana, Héctor A., y Brenda Amenityro-Angeles. 2011. "Benthic Biodiversity Changes due to the Opening of an Artificial Channel in a Tropical Coastal Lagoon (Mexican Caribbean)." *Journal of the Marine Biological Association of the UK* 91 (05): 969–78.
- Herrera-Silveira, J.A. 1996. "Salinity and Nutrients in a Tropical Coastal Lagoon with Groundwater Discharges to the Gulf of Mexico." *Hydrobiologia* 321 (2): 165–76.
- Hofmann, G. E., Smith, J. E., Johnson, K. S., Send, U., Levin, L. A., Micheli, F., Paytan, A., Price, N. N., Peterson, B., Takeshita, Y., Matson, P. G., de Crook, E., Kroeker, K. J., Gambi, M. C., Rivest, E. B., Frieder, C. A., Yu, P. C., y Martz, T. R. 2011. "High-frequency dynamics of ocean pH: A multi-ecosystem comparison". *PLoS ONE*, 6(12): 1-11. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0028983>
- Hughes, T. P., Barnes, M. L., Bellwood, D. R., Cinner, J. E., Cumming, G. S., Jackson, J. B. C., Kleypas, J., Van De Leemput, I. A., Lough, J. M., Morrison, T. H., Palumbi, S. R., Van Nes, E. H., y Scheffer, M. 2017. "Coral reefs in the Anthropocene". *Nature* 546(656): 82–90.. <https://doi.org/10.1038/nature22901>
- Hunter, C.L. 1993. "Genotypic Variation and Clonal Structure in Coral Populations with Different Disturbance Histories." *Evolution* 47 (4): 1213–28. doi:10.2307/2409987.
- Idjadi, J.A., Lee, S.C., Bruno, J.F., Precht, W.F., Allen-Requa, L., y Edmunds, P.J. 2006. "Rapid phase-shift reversal on a Jamaican coral reef". *Coral Reefs*. 25(2): 209–211. <https://doi.org/10.1007/s00338-006-0088-7>
- IUCN. 2022. The IUCN Red List of Threatened Species e.T133680A166010213. <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2022-2.RLTS.T133680A166010213.en>. Acceso el 10 de mayo de 2023.
- Jokiel, P.L., Rodgers, K.S., Kuffner, I.B., Andersson, A.J., Cox, E.F y Mackenzie, F.T. 2008. "Ocean Acidification and Calcifying Reef Organisms: A Mesocosm Investigation." *Coral Reefs* 27: 473–

- Jordán-Dahlgren, E. 1993. "El Ecosistema Arrecifal Coralino Del Atlántico Mexicano." *Revista de La Sociedad Mexicana de Historia Natural, Vol. Esp*, 157–75.
- Jordan-Dahlgren, E., y Rodriguez-Martinez, R.E. 2003. "The Atlantic Coral Reefs of Mexico." *Latin American Coral Reefs*, 131–58.
- Kleypas, J.A, Mcmanus, J.W. y Meñez, L.A. 1999. "Environmental Limits to Coral Reef Development: Where Do We Draw the Line?" *American Zoologist* 39: 146–59.
- Knee, K. L., y Paytan, A. 2011. "4.08 Submarine Groundwater Discharge: A Source of Nutrients, Metals, and Pollutants to the Coastal Ocean."
- Knowlton, N. 2001. "The Future of Coral Reefs." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 98 (10): 5419–25.
- Knutson, D., Robert, W., Buddemeier, W. y Smith, S. 1972. "Coral Chronometers: Seasonal Growth Bands in Reef Corals." *Science* 177: 270–72.
- Langdon, C., y M. J. Atkinson. 2005. "Effect of Elevated pCO₂ on Photosynthesis and Calcification of Corals and Interactions with Seasonal Change in Temperature/irradiance and Nutrient Enrichment." *Journal of Geophysical Research: Oceans* 110 (C9): C09S07.
- Liu, L.-, X.C., Chen, X., Xu, G. y Shu, L. 2011. "Use of Hydrologic Time-Series Data for Identification of Hydrodynamic Function and Behavior in a Karstic Water System in China." *Hydrogeology Journal* 19 (8): 1577–85.
- Lough, J.M, y Barnes, D.J. 1989. "Possible Relationships between Environmental Variables and Skeletal Density in a Coral Colony from the Central Great Barrier Reef." *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 134: 221–41.
- Lough, Janice M. 2010. "Climate Records from Corals." *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* 1: 318–31.
- Loya, Y., Sakai, K., Yamazato, K., Nakano, Y., Sambali, H. y van Woesik, R. 2001. "Coral Bleaching: The Winners and the Losers." *Ecology Letters* 4 (2): 122–31.
- Manzello, D.P., Enochs, I.C., Kolodziej, G., y Carlton, R. 2015. "Coral growth patterns of *Montastraea cavernosa* and *Porites astreoides* in the Florida Keys: The importance of thermal stress and inimical waters". *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 471: 198–207. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2015.06.010>
- Marshall, A. T., y Clode, P. 2004. "Calcification rate and the effect of temperature in a zooxanthellate

- and an azooxanthellate scleractinian reef coral". *Coral Reefs* 23(2): 218–224.
<https://doi.org/10.1007/s00338-004-0369-y>
- Marubini, F., Barnett, H., Langdon, C. y Atkinson, M.J. 2001. "Dependence of Calcification on Light and Carbonate Ion Concentration for the Hermatypic Coral *Porites Compressa*." *Marine Ecology Progress Series* 220: 153–62.
- Merino, M., Czitrom, S. Jordán, E., Martin, E., Thomé, P. y Moreno, O.. 1990. "Hydrology and Rain Flushing of the Nichupté Lagoon System, Cancún, México." *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 30 (3): 223–37.
- Miller, M. W., Piniak, G. A., y Williams, D. E. 2011. "Coral mass bleaching and reef temperatures at Navassa Island, 2006". *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 91(1): 42–50.
<https://doi.org/10.1016/j.ecss.2010.10.005>.
- Moberg, F., y Folke, C. 1999. "Ecological goods and services of coral reef ecosystems" *Ecological Economics* 29(2): 215-233.
- Moberg, F., Y Rönnback, P. 2003. "Ecosystem services of the tropical seascape: interactions, substitutions and restoration". *Ocean & Coastal Management* 46: 27-46.
- Mohan, P. M., y Karuna Kumari, R. 2018. "Conservation of coral reef environment: Perspectives for tropical islands". *Biodiversity and Climate Change Adaptation in Tropical Islands* (pp. 725–744).
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813064-3.00026-0>
- Null, K. A., Knee, K. L., Crook, E.D., de Sieyes, N. R., Rebolledo-Vieyra, M., Hernández-Terrones, L., y Paytan, A. 2014. "Composition and fluxes of submarine groundwater along the Caribbean coast of the Yucatan Peninsula". *Continental Shelf Research* 77: 38–50.
<https://doi.org/10.1016/j.csr.2014.01.011>
- Nunes, F. L. D., Norris, R. D., y Knowlton, N. 2011. "Long distance dispersal and connectivity in Amphiatlantic corals at regional and basin scales". *PLoS ONE*: 6(7).
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0022298>
- Ohde, S., y Hossain, M.M. 2004. "Effect of CaCO₃ (aragonite) saturation state of seawater on calcification of *Porites* coral". *Geochemical Journal* 38: 613-621.
- Okazaki, R.R., Towle, E.K., van Hooijdonk, R., Mor, C., Winter, R. N., Piggot, A. M., Cunning, R., Baker, A.C., Klaus, J.S., Swart, P.K., y Langdon, C. 2017. "Species-specific responses to climate change and community composition determine future calcification rates of Florida Keys reefs". *Global Change Biology* 23(3): 1023–1035. <https://doi.org/10.1111/gcb.13481>
- Olivo, J. P. D., McCulloch, M.T. y Judd, K. 2013. "Long-Term Records of Coral Calcification across the

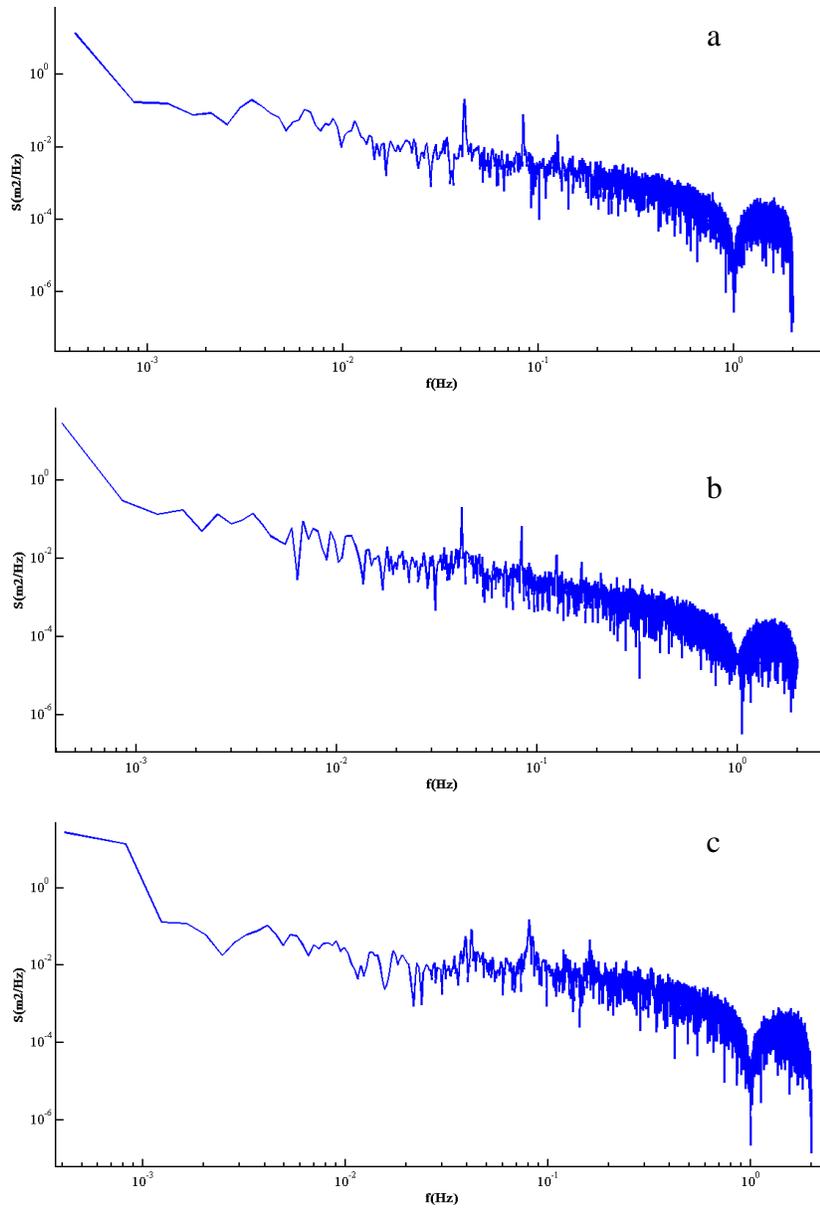
- Central Great Barrier Reef: Assessing the Impacts of River Runoff and Climate Change.” *Coral Reefs* 32 (4): 9990–1012.
- Pandolfi, J.M., y Jackson, J.B.C. 2006. “Ecological Persistence Interrupted in Caribbean Coral Reefs.” *Ecology Letters* 9 (7): 818–26.
- Parra, S.M., Valle-Levinson, A., Mariño-Tapia, I., y Enriquez, C. 2015. “Salt intrusion at a submarine spring in a fringing reef lagoon”. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120(4): 736–2750. <https://doi.org/10.1002/2014JC010459>
- Parra, S., Marino-Tapia, I., Enriquez, C. y Valle-Levinson, A. 2014. “Variations in Turbulent Kinetic Energy at a Point Source Submarine Groundwater Discharge in a Reef Lagoon.” *Ocean Dynamics* 64:1601–1614.
- Perry, C.T., Edinger, E.N. Kench, P.S, Murphy, G.N., Smithers, S.G., Steneck, R.S, y Mumby, P.J. 2012. “Estimating Rates of Biologically Driven Coral Reef Framework Production and Erosion: A New Census-Based Carbonate Budget Methodology and Applications to the Reefs of Bonaire.” *Coral Reefs* 31: 853–68.
- Perry, C.T., y Larcombe, P. 2003. “Marginal and non-reef-building coral environments”. *Coral Reefs* 22(4): 427–432. <https://doi.org/10.1007/s00338-003-0330-5>.
- Rivera, H.E., y Goodbody-Gringley, G. 2014. “Aggregation and cnidae development as early defensive strategies in *Favia fragum* and *Porites astreoides*”. *Coral Reefs* 33(4): 1079–1084. <https://doi.org/10.1007/s00338-014-1180-z>
- Rodolfo-Metalpa, R., Peirano, A., Houlbrèque, F., Abbate, M., y Ferrier-Pagès, C. 2008. “Effects of temperature, light and heterotrophy on the growth rate and budding of the temperate coral *Cladocora caespitosa*”. *Coral Reefs* 27(1): 17–25. <https://doi.org/10.1007/s00338-007-0283-1>
- Rodríguez-Martínez, R. y Jordán-Dahlgren, E. 1999. “Epibiotic and free-living *Porites astreoides*”. *Coral Reefs* 18: 159–161. <https://doi.org/10.1007/s003380050172>
- Rodríguez-Martínez, R.E, Ruíz-Rentería, F., van Tussenbroek, B., Barba-Santos, G., Escalante-Mancera, E., Jordán-Garza, G. y Jordán-Dahlgren, E. 2010. “Environmental State and Tendencies of the Puerto Morelos CARICOMP Site, Mexico.” *Revista de Biología Tropical* 58 Suppl 3 (October): 23–43.
- Schoepf, V., Grottoli, A.G., Levas, S.J., Aschaffenburg, M.D., Baumann, J. H., Matsui, Y., y Warner, M. E. (2015). “Annual coral bleaching and the long-term recovery capacity of coral”. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 282: 1-9.

- Silverman, J., Lazar, B. y Erez, J. 2007. "Effect of Aragonite Saturation, Temperature, and Nutrients on the Community Calcification Rate of a Coral Reef." *Journal of Geophysical Research: Oceans* 112 (C5): C05004.
- Smith, L. W., Barshis, D., y Birkeland, C. 2007. "Phenotypic plasticity for skeletal growth, density and calcification of *Porites lobata* in response to habitat type". *Coral Reefs* 26(3), 559–567. <https://doi.org/10.1007/s00338-007-0216-z>
- Smith, L.W., Barshis, D., y Birkeland, C. 2007. "Phenotypic plasticity for skeletal growth, density and calcification of *Porites lobata* in response to habitat type". *Coral Reefs*, 26(3): 559–567. <https://doi.org/10.1007/s00338-007-0216-z>
- Sowa, K., Tsuyoshi Watanabe, Takashi Nakamura, Saburo Sakai, and Tatsuhiko Sakamoto. 2013. "Estimation of Uncertainty for Massive *Porites* Coral Skeletal Density." *JAMSTEC Report of Research and Development* 16:31-39.
- Stambler, Noga. 2011. "Zooxanthellae: The Yellow Symbionts Inside Animals." In *Coral Reefs: An Ecosystem in Transition*, edited by Dubinsky, Z, and Stambler, N. Springer.
- Taylor, R.B., Barnes, D.J., y Lough, J.M. 1993. Simple models of density band formation in massive corals. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 167(1): 109–125. [https://doi.org/10.1016/0022-0981\(93\)90187-S](https://doi.org/10.1016/0022-0981(93)90187-S)
- Tomascik, T, y F Sander. 1985. "Effects of Eutrophication on Reef-Building Corals." *Marine Biology* 87: 143–55.
- Tomascik, T., y Sander, F. 1987. Effects of eutrophication on reef-building corals II. Structure of scleractinian coral communities on fringing reefs, Barbados, West Indies. En *Marine Biology* (Vol. 94).
- Valle-Levinson, A., Marino-Tapia, I., Enriquez, C. y. Waterhouse, A.F 2011. "Tidal Variability of Salinity and Velocity Fields Related to Intense Point-Source Submarine Groundwater Discharges into the Coastal Ocean." *Limnology and Oceanography* 56 (4): 1213–24.
- Vermeij, M.J.A., Frade, P.R., Jacinto, R.I.R., Debrot, A.O., y Bak, R. P. M. 2007. "Effects of reproductive mode on habitat-related differences in the population structure of eight Caribbean coral species". *Marine Ecology-Progress Series* 351: 91-102. <https://doi.org/10.3354/meps07085>
- Victoria-Salazar, I, Ruiz-Zárata, M.A. y Hernández-Arana, H. 2015. "Reclutamiento Coralino Como Indicador de La Resiliencia de Un Parche Arrecifal Afectado Por Un Encallamiento Dentro de Un área Natural Protegida Del Caribe Mexicano." In *Resúmenes Del VIII Congreso Mexicano de Arrecifes Coralinos*, 1:199. México.

Yakob, L., y Mumby, P.J. 2011. "Climate Change Induces Demographic Resistance to Disease in Novel Coral Assemblages." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108 (5): 1967–69.

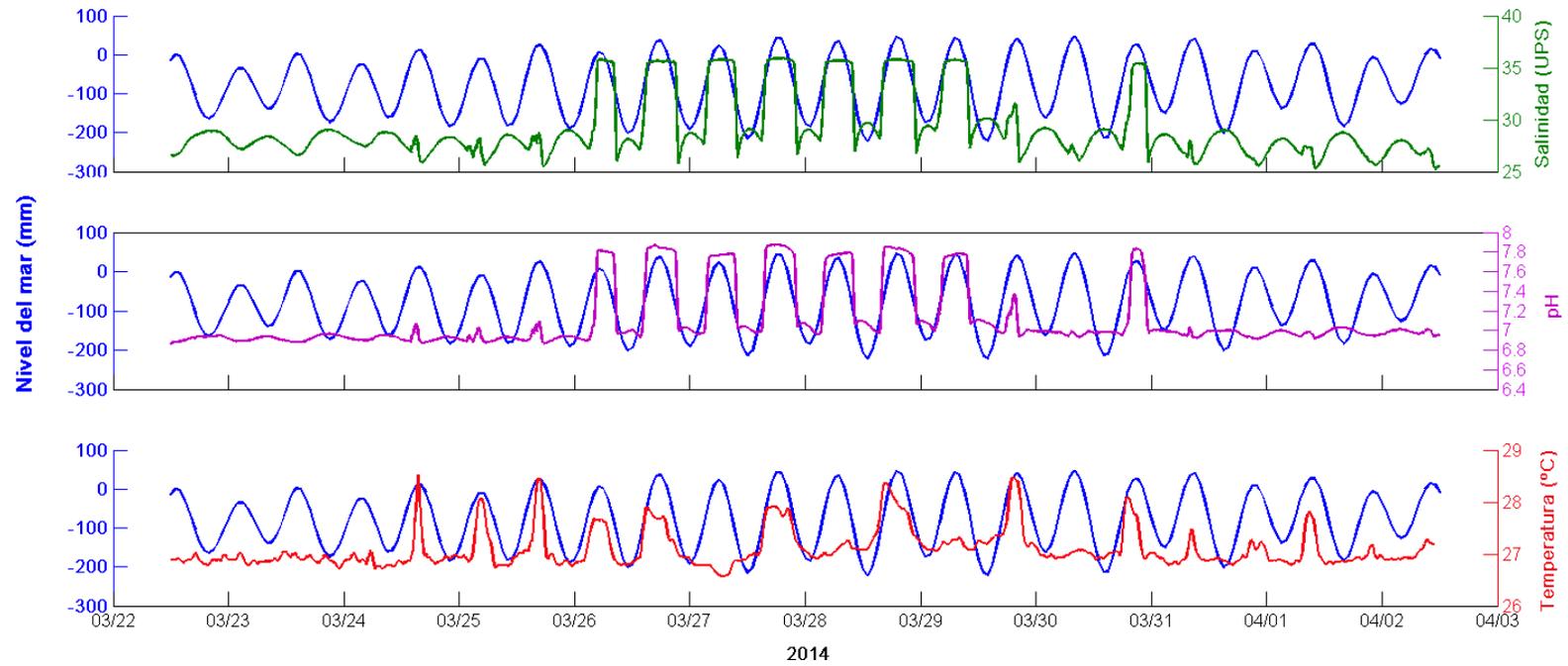
Anexos

Anexo 1

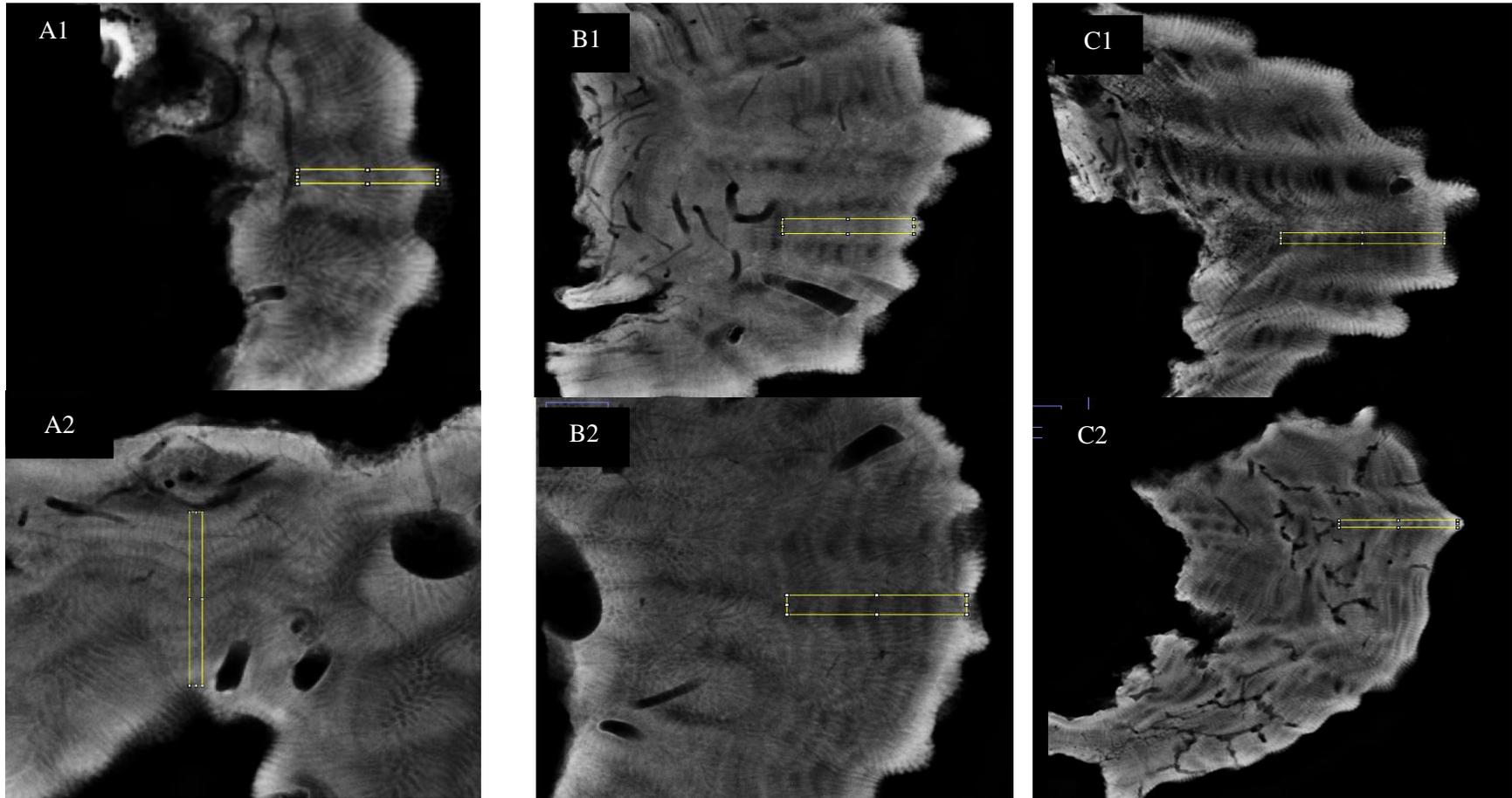


Periodograma de temperatura para los meses de Febrero a Junio de 2014 para los tres sitios: a) arrecife, b) laguna, c) ojo norte.

Anexo 2



Anexo 2 . Gráficas que muestran que las descargas están influenciadas por el nivel de marea (azul), en la primera gráfica se muestra la salinidad del ojo de agua en verde, la segunda el nivel de marea con pH(magenta) y la tercera nivel de mar con la temperatura(rojo) del ojo para el periodo de marzo a abril de 2014.



Imágenes representativas del conjunto de radiografías de cortes de lajas de *Porites astreoides* A1 y A2 (Ojo de agua), B1 y B2 (Laguna), C1 y C2 (arrecife). En los rectángulos amarillos se encuentran los segmentos analizados en cada imagen digital por medio del software Image J.