

ARTICULO ORIGINAL

Registro de temperatura superficial del mar (1778-2015) en *Orbicella faveolata* (Cnidaria: Scleractinia) del arrecife Cayo Santa María, Cuba

Sea surface temperature record (1778-2015) in *Orbicella faveolata* (Cnidaria: Scleractinia) from Cayo Santa María reef, Cuba

Carlos M. Alonso-Hernández^{1*}

Miguel Gómez-Batista²

Yusmila Helguera Pedraza²

Joán Hernández-Albernas³

Serguei D. Rico-Esenaro⁴

Ana Carolina Ruiz-Fernández⁵

Joan Albert Sánchez-Cabeza⁵

Eric Douville⁶

Paolo Montanga⁷

¹ International Atomic Energy Agency-Marine Environment Laboratories (IAEA-EL), 4 Quai Antoine 1er, MC-98000 Monaco, Principality of Monaco.

² Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos. AP 5, Ciudad Nuclear, 59350, Cienfuegos, Cuba.

³ Refugio de Fauna Cayo Santa María. Plaza Las Terrazas. Caibarién, Villa Clara, Cuba.

⁴ Departamento El Hombre y su Ambiente, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco, Ciudad de México, México.

⁵ Unidad Académica Mazatlán, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México, Calz. Joel Montes Camarena s/n, 82040 Mazatlán, México.

⁶ Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, LSCE/IPSL, CEA-CNRS-UVSQ, Université Paris-Saclay, Gif-sur-Yvette, France.

⁷ Institute of Polar Sciences, CNR, Bologna, Italy.

* Autor para correspondencia: C.M.Alonso-Hernandez@iaea.org

 OPEN ACCESS

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

Editor:
Maickel Armenteros
Universidad Nacional Autónoma de
México, UNAM

Recibido: 28.5.2021

Aceptado: 12.4.2022

Resumen

Las señales climáticas preservadas en las bandas de crecimiento del esqueleto de corales masivos ofrecen una perspectiva a largo plazo que permite comprender los cambios de la temperatura superficial del mar a diferentes escalas de tiempo. En el área del mar Caribe y el Golfo de México, especies de corales como *Orbicella faveolata*, en aguas someras, presentan formas de crecimiento masivo que facilitan el fechado de su esqueleto, lo que ha permitido la realización de estudios paleoambientales en zonas costeras donde los registros instrumentales son escasos y abarcan cortos periodos de tiempo. El propósito de este estudio fue caracterizar los registros geoquímicos en el esqueleto de un coral hermatípico *O. faveolata*, recolectado en el arrecife de Cayo Santa María, Cuba, y reconstruir la temperatura superficial del mar (TSM), con resolución anual, para los dos últimos siglos. Se obtuvieron registros de 230 años de Li/Ca, Sr/Ca, Mg/Ca, U/Ca, Li/Mg y Sr-U. De los indicadores geoquímicos analizados, el Li/Ca permitió la reconstrucción de la TSM para el área de estudio e indicó un incremento de 0.77 °C en los últimos 50 años. Además, Li/Ca corroboró con buena exactitud los periodos característicos de calentamiento y enfriamiento reportados para el mar Caribe y el Golfo de México desde 1778. *Orbicella faveolata* demostró contener un buen registro multidecadal de la temperatura anual y de la Variabilidad Multidecadal Atlántica. Los resultados son la primera reconstrucción a largo plazo de la TSM en la zona costera de Cuba y brindan información relevante para comprender el calentamiento global en la región.

Palabras clave: *Orbicella faveolata*, temperatura superficial del mar, Li/Ca, reconstrucción paleoclimática, Cuba, Caribe.

Abstract

Climatic signals preserved in the skeletal growth bands of massive corals offer a long-term perspective that allows understanding sea surface temperature changes at different time scales. In the Caribbean Sea and the Gulf of Mexico, coral species such as *Orbicella faveolata* present massive growth forms in shallow waters that facilitate dating of their skeleton, allowing to perform paleoenvironmental studies in coastal areas where instrumental records are scarce and cover short time periods. This study aimed to characterize coral geochemical records in the skeleton of a hermatypic coral *O. faveolata* collected in the Cayo Santa María (Cuba) reef and to reconstruct seawater surface annual temperatures for the last two centuries. Records of 230 years for Li/Ca, Sr/Ca, Mg/Ca, U/Ca, Li/Mg, and Sr-U were obtained. The Li/Ca indicator allowed the reconstruction of SST in the study area from 1778 to 2015, indicating an overall increase of 0.77 °C in the last 50 years. In addition, Li/Ca corroborated with high accuracy the characteristic warming and cooling periods reported for the Caribbean Sea and the Gulf of Mexico since 1778. *Orbicella faveolata* proved to contain a good multidecadal record of annual temperature and of the Atlantic Multidecadal Variability. These results are the first long-term reconstruction of SST in the Cuban coastal zone and provide relevant information to understand global warming in the Caribbean.

Keywords: *Orbicella faveolata*, seawater temperature, Li/Ca proxy, climate archives, paleoclimate reconstruction, Cuba, Caribbean.

Introducción

El coral hermatípico *Orbicella faveolata* (Ellis & Solander, 1786) es una de las principales especies de los arrecifes costeros de Cuba (Cabrales *et al.*, 2015; Ferrer-Rodriguez *et al.*, 2016; Ulmo-Díaz *et al.*, 2018). En regiones someras, esta especie presenta formas de crecimiento masivo con bandas anuales de alta y baja densidad en su esqueleto que permiten su fechado, lo que ha posibilitado realizar estudios paleoambientales y de contaminación antropogénica en diversas zonas del Caribe y el Golfo de

México (Cuny-Guirriec *et al.*, 2019; DeLong *et al.*, 2011; Flannery *et al.*, 2017; Sanchez-Cabeza *et al.*, 2021).

La temperatura oceánica superficial en los trópicos es un factor clave en el intercambio de energía en el sistema océano-atmósfera y, consecuentemente, controla gran parte de la variabilidad climática global, por ejemplo, el fenómeno El Niño / Oscilación del Sur (ENSO) (McPhaden *et al.*, 2006). A nivel global, la temperatura de la superficie del mar (TSM) ha aumentado en promedio ~1.5 °C desde el inicio de la época industrial (IPCC, 2018). La TSM afecta a procesos termodinámicos, metabólicos y biológicos, y estos cambios pueden quedar reflejados en registros geológicos. Los registros instrumentales de la TSM se remontan a ~1856, pero los registros previos a la década de 1950 se consideran poco confiables. Las bases de datos de TSM recientes son más robustas debido a que integran un mayor número de estaciones de monitoreo, así como series largas de mediciones satelitales (Deser *et al.*, 2010).

A falta de datos instrumentales, las señales climáticas preservadas en las bandas de crecimiento del esqueleto de corales masivos ofrecen una perspectiva a largo plazo, que permite comprender los cambios de TSM a diferentes escalas de tiempo (Flannery *et al.*, 2018). En las últimas décadas, se han empleado diversos indicadores (Ej. $\delta^{18}\text{O}$, Li/Ca, Mg/Ca, U/Ca, Sr/Ca, Li/Mg y Sr-U) para reconstruir la variabilidad de las TSM en regiones tropicales-subtropicales (Alpert *et al.*, 2017; Cuny-Guirriec *et al.*, 2019; DeLong *et al.*, 2014). Sin embargo, en Cuba no existen reportes sobre el uso de corales como registros climáticos.

Conocer la distribución temporal de TSM en la zona costera de Cuba, además de determinar los procesos que regulan el intercambio de energía térmica entre el océano y la atmósfera (McPhaden *et al.*, 2006) permitirá evaluar el impacto de cambios globales en las respuestas fisiológicas de los corales en el pasado (Helmle *et al.*, 2011; Lizcano-Sandoval *et al.*, 2019) y proveer información sobre posibles escenarios futuros del calentamiento global y la salud de los arrecifes cubanos.

El propósito de esta investigación fue caracterizar los registros geoquímicos (Li/Ca, Mg/Ca, U/Ca, Sr/Ca, Li/Mg y Sr-U) en el esqueleto de un coral de la especie *O. faveolata* para reconstruir las variaciones de TSM en la región del arrecife de Cayo Santa María, al centro-norte de Cuba.

Materiales y métodos

Área de estudio

Cayo Santa María pertenece al archipiélago Sabana-Camagüey, en el sector norcentral de la plataforma de Cuba. Separado a más de 20 km de la isla principal, presenta condiciones favorables para el desarrollo de arrecifes de coral, playas, pastos marinos y manglares.

Con un clima de poca variación anual térmica, el verano es caluroso y húmedo (estación lluviosa), con un régimen de brisas del Este, provenientes del centro de altas presiones del Atlántico, que se mantiene constante casi todo el día. El invierno (estación seca) es confortable con temperaturas cálidas, interrumpidas periódicamente por el paso de los sistemas frontales que avanzan desde latitudes más altas provenientes del continente americano. Son características de esta región la nubosidad media (entre dos y tres octavos) y la insolación con valores superiores a las siete horas luz durante todo el año (ACC-ICGC, 1990).

Es frecuente en el verano, fundamentalmente en los meses de julio a septiembre, el paso de ondas tropicales procedentes del Atlántico, que cruzan hacia el Caribe y se trasladan sobre el noreste en cualquier período. Los arrecifes de coral proliferan fundamentalmente entre los 7-15 m y los 22-29 m en el sublitoral rocoso de esta zona, mejor representado hacia el O-SO del cayo. Con un flujo diario de mareas semidiurnas mixtas, el área se nutre de las aguas limpias que le llegan desde mar abierto y las más eutrofizadas que provienen de los manglares que bordean el sur de la cayería y las escorrentías de la zona norte de la Provincia de Villa Clara (ACC-ICGC, 1990).

A partir de mediados de la década de los 90, el área pudo haber experimentado impactos locales debido al

desarrollo costero que implicó la apertura de un polo turístico en la región, que anteriormente había permanecido prístina.

Muestreo, preparación y fechado de muestras

En marzo de 2016, se recolectó un núcleo de coral (97 cm de longitud) de una colonia de *O. faveolata* ubicada a ~10 m de profundidad en la zona de Cayo Santa María, al norte de la provincia de Villa Clara, Cuba (núcleo CSM1; 79.10 O, 22.66 N) (Fig. 1). Para la recolección del núcleo se utilizó un taladro neumático sumergible Tech 2000® (barrenas diamantadas de 10 cm de diámetro interno y 30 cm de longitud) siguiendo el eje de máximo crecimiento de la colonia. El núcleo se extrajo en tres tramos, los cuales se marcaron y se llevaron inmediatamente al laboratorio, donde se lavaron con agua destilada y se ensamblaron cuidadosamente para ser fotografiados (Fig. 1).

Para el fechado del núcleo y la determinación de las variables de crecimiento (tasas de extensión y de calcificación) se siguió la metodología descrita en Rico-Esenaro *et al.* (2019). Brevemente, cada tramo del núcleo se cortó transversalmente desde el centro, con una sierra para rocas, para obtener lascas de 1 cm de espesor (CSM1-L1, CSM-L2, CSM-L3). La laja CSM1-L1 fue radiografiada en Imágenes Diagnósticas de Mazatlán (parámetros de exposición: 81 kV, 32 mA, 0.2 s) junto con una cuña de aragonito (de dimensiones y densidad conocidas) que sirvió como patrón para la calibración de la densidad óptica como densidad esquelética (Fig. 1). El fechado del núcleo se realizó mediante esclerocronología sobre las imágenes radiográficas de la laja CSM1- L1.

Análisis geoquímicos

De la laja CSM1- L1, con un micro taladro con sierra diamantada, se cortaron muestras de ~ 350 mg del esqueleto de coral con resolución anual (extraídas

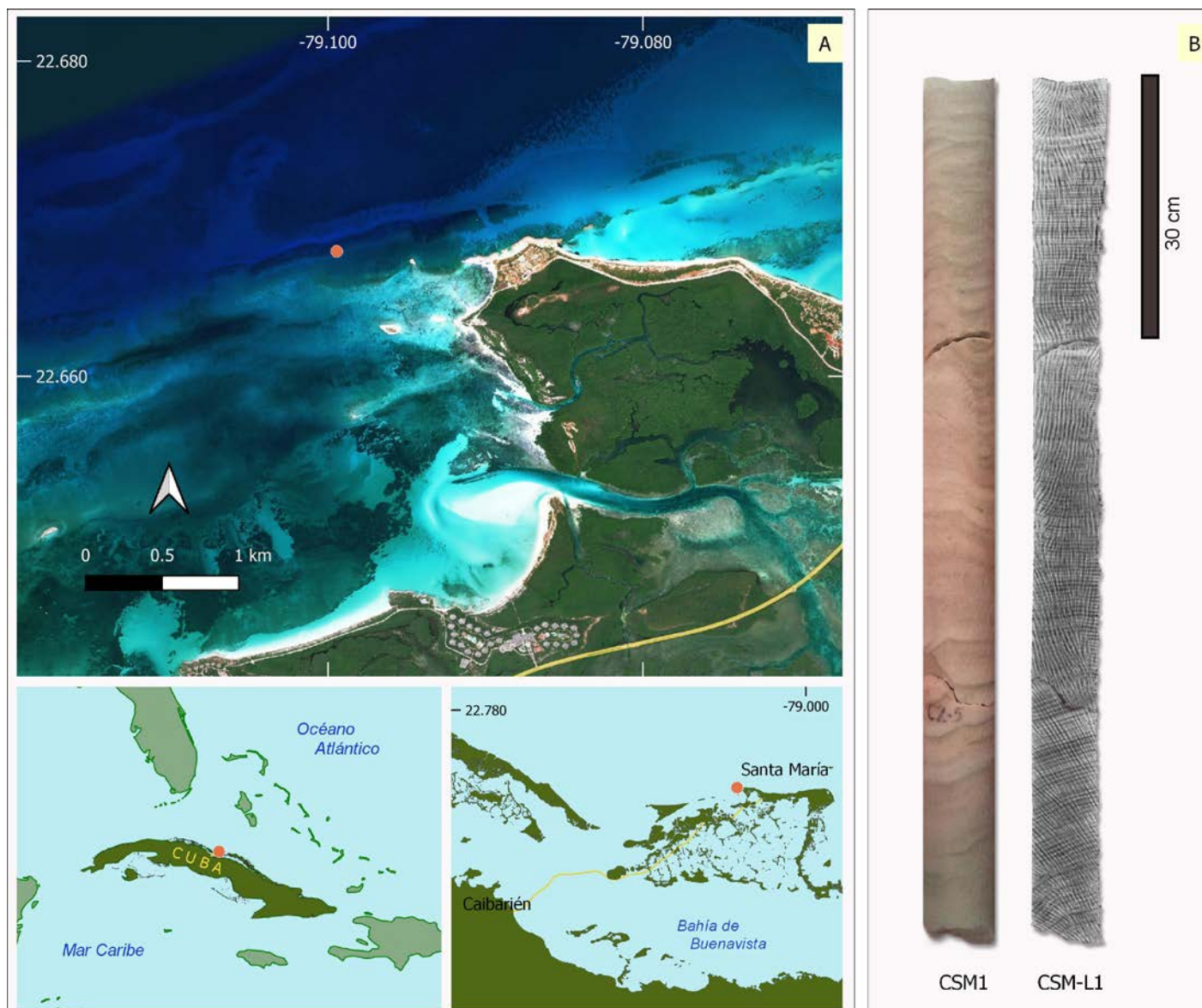


Fig. 1. (A) Sitio de recolecta (punto rojo) del núcleo de una colonia de *Orbicella faveolata* en el arrecife de Cayo Santa María, Cuba. (B) Foto del núcleo extraído (CSM1) y radiografía de la laja (CSM1-L1) empleada en los análisis de densitometría óptica.

entre las bandas de alta densidad). Se aseguró completar 200 mg de material para los análisis geoquímicos. Adicionalmente, para obtener registros con resolución sub-anual y bajo la suposición de tasa de crecimiento constante (Cruz-Piñón *et al.*, 2003; Carricart-Ganivet, 2007), se extrajeron seis muestras (mediante cortes paralelos y equidistantes) entre las

bandas anuales de alta densidad en el segmento del núcleo correspondiente al período de 2007 a 2009. El criterio de selección fue aleatoriedad. Las muestras se molieron a grano fino en un mortero de ágata, se pesaron en una balanza analítica y se depositaron en tubos Eppendorf de 1.5 mL con tapón de rosca debidamente etiquetados.

Cada muestra pulverizada (~ 45 mg) fue sometida a un protocolo de limpieza química para eliminar la materia orgánica. Con este fin, se añadieron 5 ml de agua MilliQ (x2) y la mezcla se sometió a baño ultrasónico durante 30 s en tubos de centrifuga de 50 mL. Se centrifugó a 3000 rpm durante 15 s y el líquido sobrenadante se eliminó por decantación. Se añadieron 150 ml de H₂O₂ (15%) (tamponado con HN₄OH 0.5 M), se dejó en una placa de calentamiento a 60 °C por 20 min; la mezcla se centrifugó a 4 000 rpm por 2 min y el sobrenadante se eliminó por decantación. Para enjuagar la muestra se añadieron 50 ml de agua MilliQ, se centrifugó y eliminó el sobrenadante; el proceso se repitió cuatro veces con 5 ml de agua MilliQ. La muestra se secó en horno a 50 °C durante 12 h y se disolvieron los carbonatos mediante la adición de 10 mL de HNO₃ 0.5 N (Cuny-Guirriec *et al.*, 2019).

Para cuantificar la concentración elemental en el esqueleto se seleccionaron los isótopos ^{87,88,86}Sr, ⁷Li, ²⁴Mg, ^{43,44}Ca y ²³⁸U de acuerdo a los métodos descritos por Bourdin *et al.* (2011) y Montagna *et al.* (2014) en un equipo ICP-MS X-Series II Cuadrupolar en el Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (Gif-sur-Yvette, Francia). Las soluciones estándar y de muestra se diluyeron para obtener una concentración de 100 ppm de Ca. El análisis elemental se realizó a través de un protocolo de adición de estándares. La calidad de los datos se controló mediante 4 estándares externos de carbonato (Aragonite AK, RS3, coral JCP1 y clam JCT-1) y un estándar interno (muestra de coral de la especie *Porites*).

Tratamiento de datos

Estadísticos básicos

Para el análisis estadístico de los datos geoquímicos se realizaron pruebas estadísticas de normalidad (Shapiro-Wilk), análisis de varianza (F-Fisher) y comparación de medias (Wilcoxon y *t-Student*). El indicador Li/Mg fue calculado del cociente entre Li/Ca y Mg/Ca, mientras que el indicador Sr-U se calculó a partir de la ecuación $Sr-U = Sr/Ca - 1.1107 * U/Ca$ (DeCarlo *et al.*, 2016).

Estimación de TSM

Los registros de indicadores geoquímicos fueron convertidos a TSM usando ecuaciones de calibración específicas para *O. faveolata* (Sr/Ca, Li/Mg, Sr-U (Alpert *et al.*, 2017; Flannery *et al.*, 2018) y *Porites spp.*: Li/Ca (Hathorne *et al.*, 2013). En la Tabla S1 del material suplementario, se presentan las ecuaciones utilizadas (indicador geoquímico = a + b * TSM). Las medias y tendencias temporales de la TSM se compararon con los registros históricos de TSM disponibles para la zona de Cayo Santa María, descritos a continuación.

Registros históricos de temperatura en Cayo Santa María

Debido a la falta de datos instrumentales de TSM en Cayo Santa María durante el periodo de formación del coral, para calibrar la respuesta de los indicadores geoquímicos a las variaciones de la temperatura, se emplearon datos de TSM mensual del portal "Optimum Interpolation Sea Surface Temperature" (OISST, *por sus siglas en inglés*) (Huang *et al.*, 2020) que dispone de información desde 1981. Los datos de TSM con interpolación óptima diaria (TSM_{OISST}) se obtienen mediante la combinación de observaciones de diferentes plataformas (satélites, barcos, boyas y flotadores) en una cuadrícula global regular. Con esta información se produce un mapa diario de la TSM, cuyas zonas vacías se completan por interpolación. Esta metodología incluye el ajuste del sesgo de las observaciones de los satélites y los barcos (respecto a las boyas) para compensar las diferencias de las plataformas y los sesgos de los sensores (Huang *et al.*, 2020).

Los datos de TSM_{OISST} se corroboraron con medidas instrumentales (registrador HOBO UA-002-64, periodo de 30 min) durante el periodo junio 2018 a julio 2019. Con la regresión entre TSM_{OISST} y los datos instrumentales, se ajustó la serie mensual de TSM_{OISST} para Cayo Santa María durante el periodo 1982-2015 (TSM₁₉₈₂₋₂₀₁₅). Esta serie se utilizó para calibrar los registros de temperatura derivados de los indicadores geoquímicos y, finalmente, reconstruir el registro de temperaturas para todo el núcleo de coral

($TSM_{1778-2015}$). Las incertidumbres del modelo fueron calculadas por el método de Monte Carlo.

Para validar el registro de la $TSM_{1778-2015}$, se utilizó una base de datos independiente (*Hadley Centre Sea Ice and Sea Surface Temperature data set* (Rayner *et al.*, 2003) que contiene información para el periodo 1870-2015 ($TSM_{HadISST}$). Ambas series de datos (OISST y HadISST) fueron descargadas del sitio *Climate Explorer* de la Organización Meteorológica Mundial (<https://climexp.knmi.nl>).

Calibración de indicadores de temperatura y reconstrucciones históricas

Se realizaron análisis de correlación y covarianza para evaluar la relación entre los indicadores geoquímicos del núcleo de coral y la $TSM_{1982-2015}$. Se usaron modelos de regresión lineal para obtener ecuaciones de calibración para aquellos indicadores geoquímicos correlacionados significativamente con la $TSM_{1982-2015}$ (correlación de Pearson, R). El modelo lineal fue aplicado a la serie de indicadores geoquímicos y se reconstruyó la variación anual de la TSM en Cayo Santa María, para el registro completo del núcleo de coral. Las líneas de tendencias fueron calculadas utilizando la regresión polinomial ponderada Loess. Finalmente, se evaluaron las anomalías en las TSM obtenidas y su relación con el índice de Oscilación Multidecadal del Atlántico norte - AMO (*Atlantic Multidecadal Oscillation*, por sus siglas en inglés). Todos los análisis estadísticos y elaboración de gráficos fueron realizados con el software OriginPro versión 2021.

Resultados

De acuerdo con el análisis de esclerocronología realizado, el crecimiento promedio del coral fue de 4.076 ± 0.12 mm año⁻¹. El fechado indicó que el núcleo de coral contiene un registro temporal de 237 años, correspondiente al periodo 1778-2015.

Se obtuvieron los valores de Li/Ca, Mg/Ca, Sr/Ca, U/Ca, Li/Mg y Sr-U de 236 bandas anuales (Tabla 1). Ninguno de los conjuntos de datos analizados presentó normalidad estadística (Shapiro-Wilk, $p > 0.05$). Los datos de cada sección y la distribución de frecuencia para cada uno de los indicadores geoquímicos analizados se muestran en el material suplementario (Fig. S1).

Las series temporales obtenidas de los indicadores Li/Ca, Mg/Ca, Sr/Ca, U/Ca, Li/Mg y Sr-U fueron no estacionarias (Fig. 2) y en todos los casos mostraron tendencias significativas ($p < 0.05$). Las distribuciones fueron suavizadas utilizando una regresión polinomial ponderada Loess (intervalo = 0.5).

En los registros de Mg/Ca y Li/Mg se observó la mayor dispersión, con pronunciados máximos para Mg/Ca y consecuentemente mínimos de Li/Mg distribuidos irregularmente a lo largo del perfil (Fig. 2). Estos máximos en la concentración de Mg se correspondieron con las bandas de color verde observadas en el interior del esqueleto de coral, durante la preparación de las muestras.

Se obtuvo la variación temporal de los valores de temperatura determinados instrumentalmente (TSM_{inst}) para CSM en el periodo 2018-2019 y los reportados de la

Tabla 1. Estadística básica de los indicadores geoquímicos en el núcleo de coral de la especie *O. faveolata* (núcleo CSM1) del arrecife de Cayo Santa María, Cuba. Los datos corresponden a muestras de la laja CSM1-L1 y al periodo 1778 - 2015.

Parámetros	Li/Ca $\mu\text{mol mol}^{-1}$	Mg/Ca mmol mol^{-1}	Sr/Ca mmol mol^{-1}	U/Ca $\mu\text{mol mol}^{-1}$	Sr-U	Li/Mg $\mu\text{mol mmol}^{-1}$
Media	6.64	4.01	9.30	1.26	7.89	1.67
Desviación estándar	0.16	0.50	0.05	0.04	0.03	0.16
Valor mínimo	6.30	3.46	9.15	1.13	7.79	1.01
Primer cuartil (Q1)	6.54	3.72	9.28	1.24	7.87	1.62
Mediana	6.62	3.88	9.31	1.27	7.90	1.71
Tercer cuartil (Q3)	6.75	4.16	9.34	1.29	7.92	1.77
Valor máximo	7.24	6.31	9.4	1.32	8.00	1.90

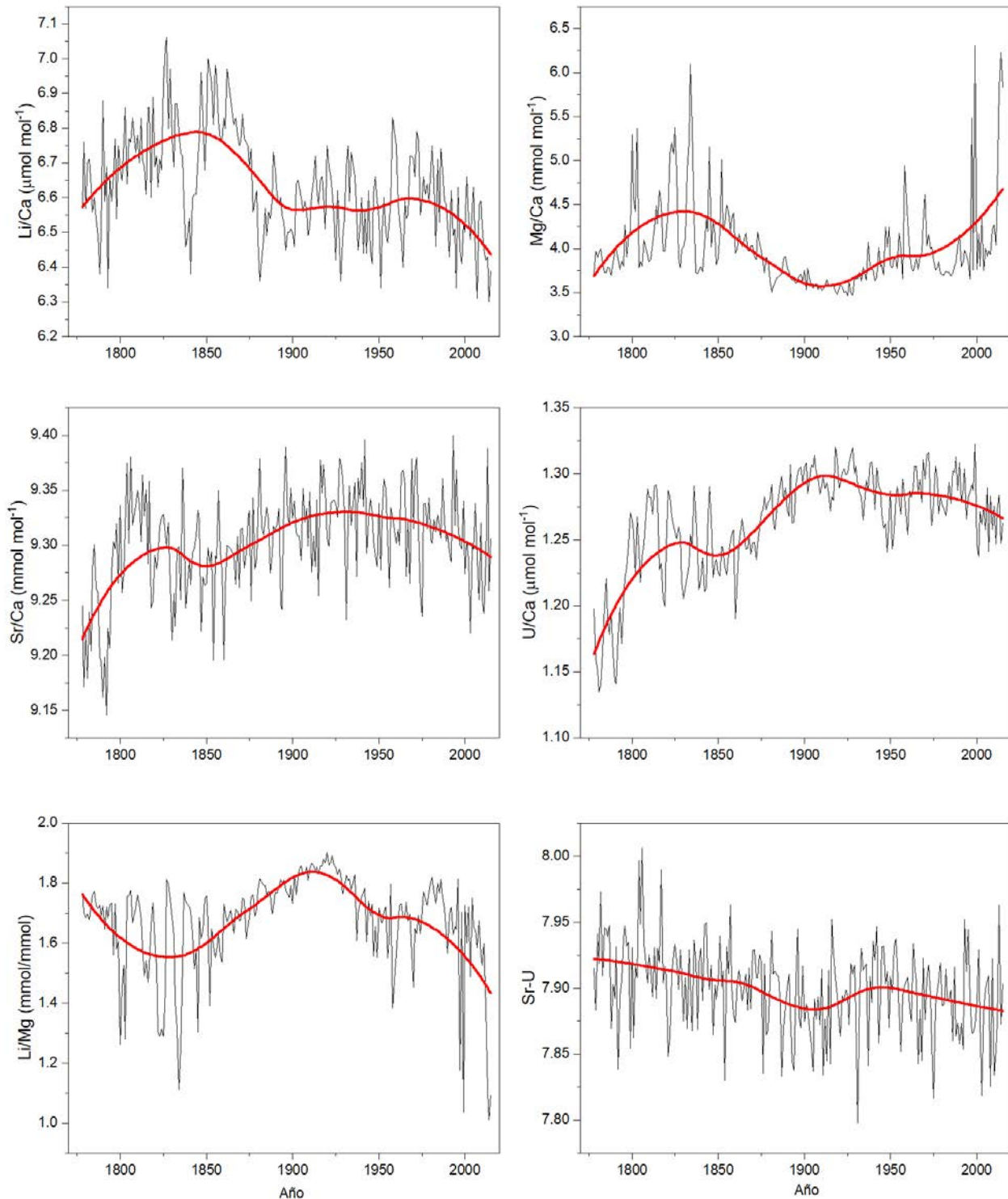


Fig. 2. Evolución temporal de los indicadores geoquímicos Li/Ca, Mg/Ca, Sr/Ca, U/Ca, Li/Mg y Sr-U de la laja CSM1-L1 de la especie *Orbicella faveolata*.

serie de datos de TSM_{OISST} (Fig. 3A). Los datos de TSM_{inst} no presentaron una distribución normal (Shapiro-Wilk, $p < 0.05$); el valor de la mediana para el periodo fue de 27.65°C ($Q1 = 26.59^{\circ}\text{C}$, $Q3 = 28.35^{\circ}\text{C}$), con mínimo de 24.99°C y máximo de 29.57°C . El análisis de varianza no paramétrico (Kruskal-Wallis) indicó diferencias no significativas entre las dos series de datos ($p > 0.05$). Ambas series de datos se correlacionaron significativamente ($R = 0.97$, $p < 0.05$). A partir del modelo de regresión lineal

entre los datos de ambas series (Fig. 3B) se ajustó la serie mensual de TSM_{OISST} (Fig. 3C) y se completó el registro de valores de TSM mensual y anual en Cayo Santa María para el período 1982-2015 (Fig. 3D).

A partir de las concentraciones elementales obtenidas y mediante las ecuaciones de calibración propuestas por otros autores para *O. faveolata* (Tabla S1), se obtuvo la TSM anual en CSM para el periodo 1982-2015. Las distribuciones de TSM obtenidas a partir de estas ecuaciones

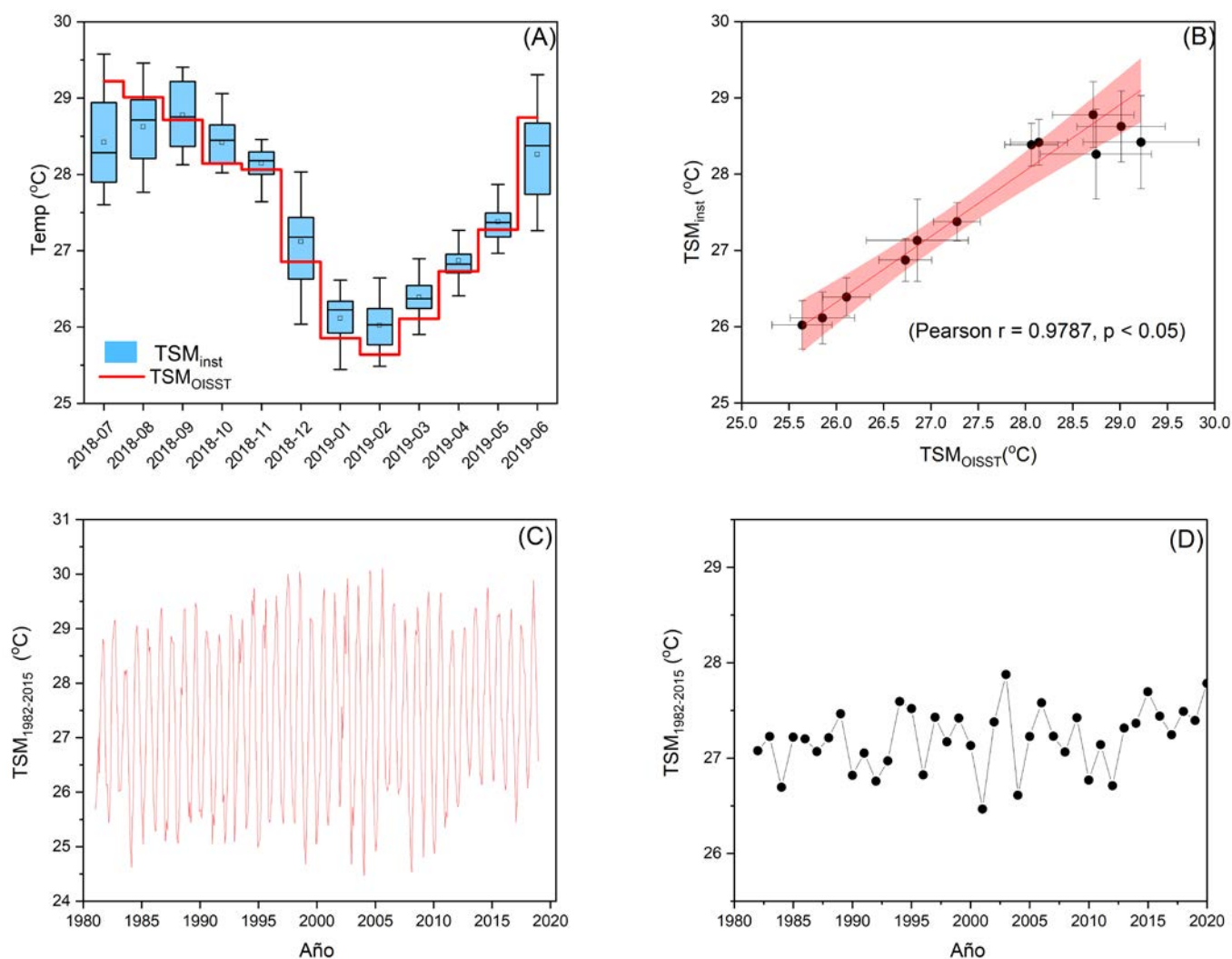


Fig. 3. (A) Patrón mensual de TSM_{OISST} e instrumental (TSM_{inst}) para el periodo 2018-2019 en CSM. (B) Correlación entre TSM_{OISST} y TSM_{inst} . (C) Serie de TSM_{OISST} mensual para CSM ajustada con base a TSM_{inst} (D) TSM anual para CSM en el periodo 1982-2015 ($TSM_{1982-2015}$).

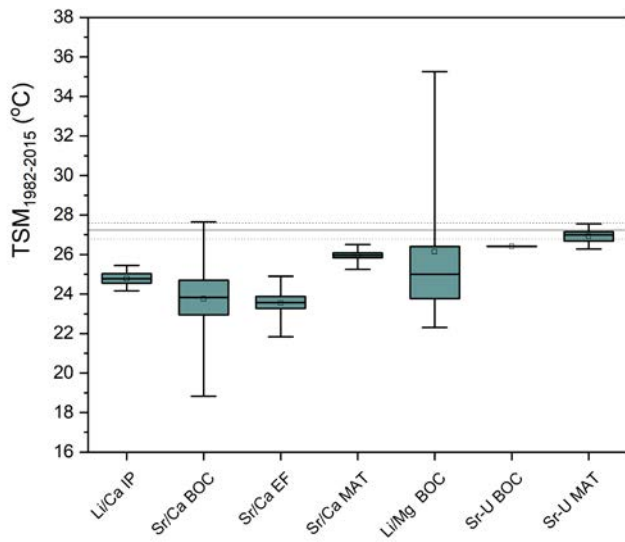


Fig. 4. Temperatura superficial del mar (1982-2015) de Cayo Santa María, estimada por los indicadores Li/Ca, Sr/Ca, Li/Mg y Sr-U, a partir de ecuaciones propuestas para *O. faveolata*, *Porites* o multi-especies en la región (Tabla S1 del material suplementario). IP: Indo-Pacífico, BOC: Bocana, Laguna Arrecifal Puerto Morelos; EF: Isla Tortuga, Estrecho de la Florida; MAT: Múltiples sitios en el Atlántico Tropical. La línea negra corresponde la mediana y las líneas punteadas a los cuartiles (25 y 75%) de la TSM₁₉₈₂₋₂₀₁₅.

utilizadas presentaron diferencias estadísticamente significativas (Wilcoxon, $p < 0.05$) con relación a distribución de TSM₁₉₈₂₋₂₀₁₅. La relación Li/Mg simuló temperaturas

de hasta 35 °C, mientras con el indicador Sr/Ca se obtuvieron temperaturas anuales mínimas de hasta 18 °C, que son valores irreales para la zona de estudio (Fig.4).

Los registros geoquímicos sub-anales (período 2007-2009) indicaron relaciones estadísticamente no significativas ($p > 0.05$) con el registro de TSM.

Los indicadores Li/Ca ($R = -0.677$, $p < 0.05$), Mg/Ca ($R = 0.519$, $p < 0.05$) y Li/Mg ($R = 0.577$, $p < 0.05$) mostraron una relación estadísticamente significativamente con los valores anuales de TSM₁₉₈₂₋₂₀₁₅ ($p < 0.05$) (Tabla S2). El resto de los indicadores geoquímicos, Sr/Ca, U/Ca y Sr-U, no presentaron relación estadísticamente significativa con la temperatura ($p < 0.05$). Debido a las limitaciones presentadas para los indicadores Li/Mg y Mg/Ca, y a que los indicadores Sr-U, Sr/Ca y U/Ca no mostraron asociación con los valores de TSM₁₉₈₂₋₂₀₁₅, no fue posible establecer un modelo de calibración que permitiera utilizarlos como indicadores de temperatura; quedando Li/Ca como único indicador potencial de la temperatura para CSM en la especie *O. faveolata*.

Un modelo de regresión lineal entre los valores de Li/Ca y TSM₁₉₈₂₋₂₀₁₅ (Fig. 5A) permitió obtener la ecuación de calibración para reconstruir el registro de

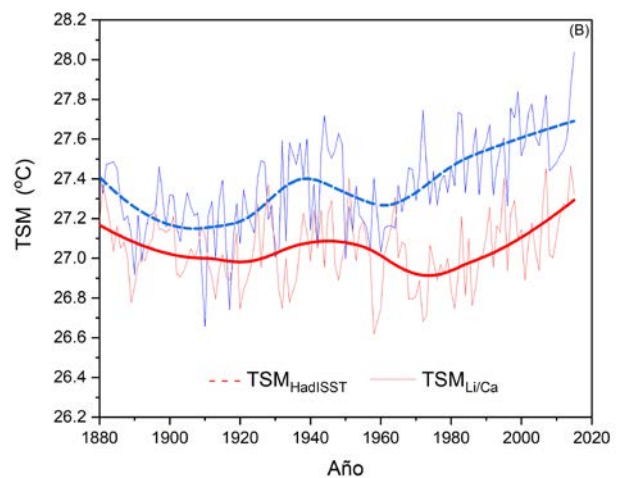
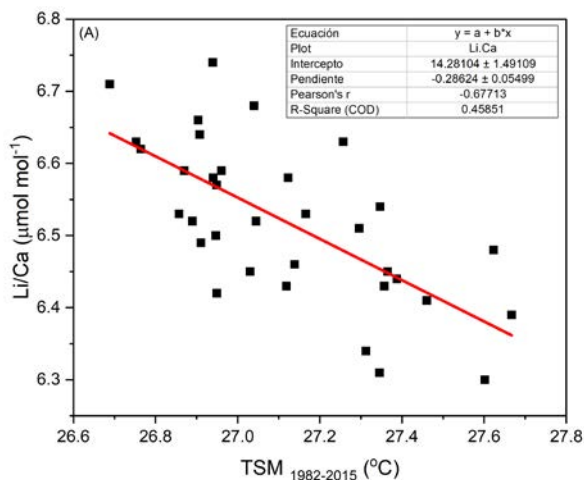


Fig. 5. (A) Relación entre el indicador de temperatura Li/Ca y la TSM en CSM en el periodo 1982– 2015. (B) Modelos de regresión suavizado loess (intervalo = 0.5) para los indicadores de temperatura de Li/Ca (línea roja continua) y TSM_{HadISST} (línea azul discontinua) en CSM.

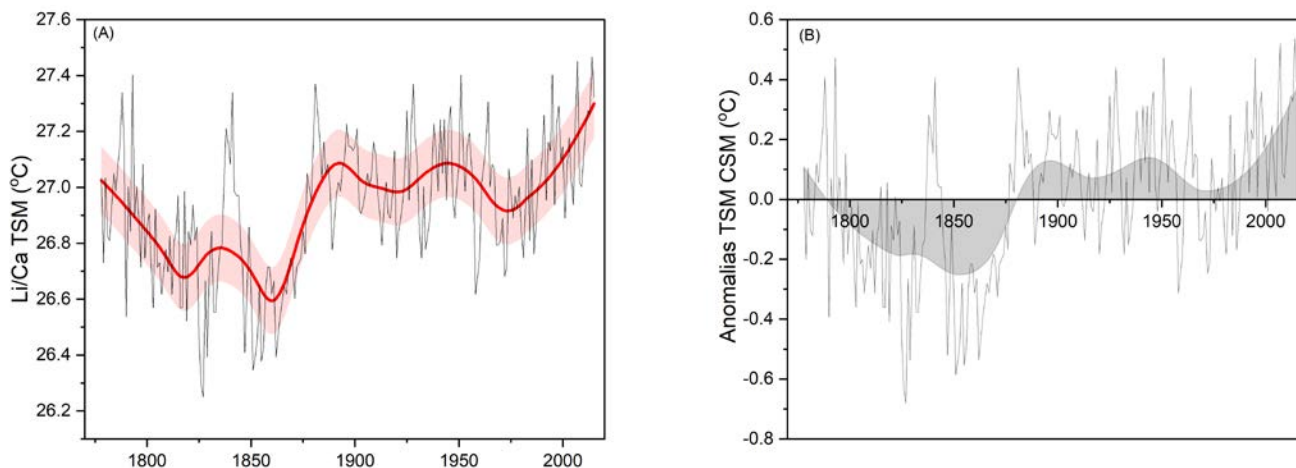


Fig. 6. (A) Reconstrucción de la TSM en CSM con los indicadores de temperatura de Li/Ca de la laja CSM1-L1. (B) Comportamiento de la anomalía de TSM respecto a la mediana para el periodo 1778-2015. Modelos de regresión suavizado loess (intervalo = 0.5).

TSM media anual en CSM para el periodo 1778-2015, expresada como $TSM_{Li/Ca} = (37.6 \pm 2.0) - (1.60 \pm 0.31) \times Li/Ca$. El registro temporal de $TSM_{Li/Ca}$ para el periodo 1778-2015 (Fig. 6A) obtenido siguió una distribución normal (Shapiro-Wilk, $p > 0.05$) y mostró que la media anual de TSM en CSM osciló entre un mínimo de 25.23 °C en 1827 a un máximo de 27.89 °C en 2014 (rango = 1.23 °C) durante los últimos 237 años.

La correlación entre las anomalías de registro de $TSM_{Li/Ca}$ y el índice AMO (ambos grupos de valores

suavizados) fue alta ($R = 0.83$; Fig. 7) y estadísticamente significativa ($p < 0.05$).

Discusión

Las bandas de alta densidad de los corales hermatípicos masivos *O. faveolata* están relacionadas con la estación más cálida del año y su conteo permite definir la escala temporal de crecimiento del coral (Carricart-Ganivet *et al.*, 2007). En esta investigación los valores obtenidos en las tasas de extensión se encontraron dentro del intervalo de valores reportados por otros autores para esta especie (Carricart-Ganivet *et al.*, 2007; Rico-Esenaro *et al.*, 2019).

Varios autores han asociado las bandas verdes observadas en *O. faveolata* a una notoria acumulación de clorofila (Cuny-Guirriec *et al.*, 2019). La acumulación de clorofila, rica en Mg, es producto del desarrollo de algas endolíticas, que generalmente ocurre en períodos posteriores a eventos de blanqueamiento y tiene repercusiones importantes en los registros de Mg (Cuny-Guirriec *et al.*, 2019). Las relaciones Mg/Ca y Li/Mg han sido utilizadas como indicadores de temperatura por otros autores (p. ej. Cuny-Guirriec *et al.*, 2019), particularmente en corales de la especie *Porites*. Sin embargo, a pesar de haberse utilizado protocolos

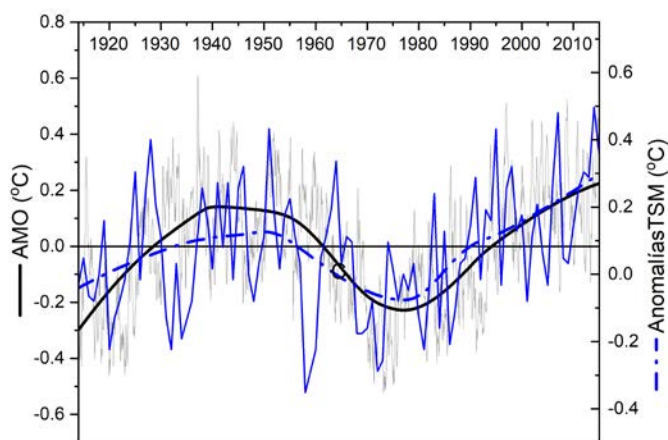


Fig. 7. Comparación del índice de Oscilación Multidecadal Atlántica (AMO), línea negra continua y las anomalías de temperatura superficial del mar a partir del registro $TSM_{Li/Ca}$, línea discontinua azul. Modelos de regresión lineal (suavizado loess, span = 0.5).

de limpieza meticulosos en esta investigación, los registros de Mg/Ca y Li/Mg para la especie *O. faveolata* se vieron afectados por la presencia de algas endolíticas, lo que impidió realizar una calibración adecuada. Nuestros resultados confirman que los indicadores Li/Mg y Mg/Ca no son adecuados para esta especie de coral, en concordancia con otros estudios realizados en el Caribe (Cuny-Guirriec *et al.*, 2019; Sanchez-Cabeza *et al.*, 2021).

Las discrepancias encontradas en la estimación de TSM anual de CSM para el periodo 1982-2015, a partir de las concentraciones elementales obtenidas y mediante las ecuaciones de calibración propuestas previamente para *O. faveolata*, podrían estar relacionadas con el “efecto de especie” (Weber, 1973) y la variabilidad intra- e inter-colonial planteada por DeLong *et al.* (2011) y Rico-Esenaro *et al.* (2019). Este efecto incorpora diferentes respuestas fisiológicas entre especies, géneros y colonias que inducen a que los corales incorporen de forma variable los elementos químicos disueltos usados como indicadores de temperatura (Helmle *et al.*, 2011); esto ocurre aún si los corales crecen en la misma región y están expuestos a las mismas condiciones ambientales. Además de la influencia del efecto de especie, las proporciones Sr/Ca, Mg/Ca, Li/Ca y U/Ca en el coral dependen tanto de la proporción de cada metal/Ca en el agua, como del coeficiente de distribución $\left(\frac{\text{metal}}{\text{Ca}}\right)_{\text{aragonita}} / \left(\frac{\text{metal}}{\text{Ca}}\right)_{\text{agua de mar}}$, que son función de la temperatura del medio. Las discrepancias observadas indican la necesidad de realizar calibraciones propias que recaben resultados más exactos de los registros de TSM en la zona de estudio.

La ausencia de relaciones estadísticamente significativas entre los registros geoquímicos sub-anales (período 2007-2009) con el registro de TSM, podría deberse al poco espesor de las bandas anuales del núcleo de coral (4-5 mm) y a las limitaciones en las capacidades instrumentales disponibles para el submuestreo en esta investigación.

La comparación del registro de TSM obtenido ($TSM_{Li/Ca}$) con el registro de $TSM_{HadISST}$ (Fig. 5B) mostró que las tendencias en ambas series son compatibles a lo largo del periodo y que el registro $TSM_{Li/Ca}$ reproduce adecuadamente los periodos reconocidos como “ligero enfriamiento” (1871-1909), “escasa variación” (1946-1975) y “calentamiento pronunciado” (1910-1945 y 1976-1999) (Rayner *et al.*, 2003). No obstante, a partir de 1960, los valores promedio de $TSM_{HadISST}$ son consistentemente más altos (~ 0.3 °C) que en $TSM_{Li/Ca}$. El origen de esta discrepancia es multifactorial, ya que la reconstrucción de ambos registros implica diversos procedimientos de modelización que acumulan desviaciones. Cuando se comparan bases de datos de TSM, se obtienen tendencias similares pero con diferencias de valor absoluto en periodos específicos, como se evidencia en la descripción de la base de datos $TSM_{HadISST}$ (Rayner *et al.*, 2003).

Del análisis de cambios en la medias y varianza de la distribución obtenida y las anomalías de temperatura respecto a la TSM media anual de 26.89 °C (1778-2015), la serie temporal obtenida puede ser dividida en cuatro periodos (Fig. 6B).

El periodo I (1778-1855), en la sección más antigua del registro, coincide con el final de la Pequeña Edad de Hielo (Little Ice Age, LIA, 1400-1850 CE (Hodell *et al.*, 2005)). Este periodo se caracteriza por una temperatura media anual de 26.75 °C y anomalías máximas de hasta 0.47 °C. Varios estudios realizados en la región del Caribe y el Golfo de México demuestran que la TSM en el área fue en general más fría durante la LIA pero también variable con intervalos fríos alternados con condiciones más moderadas (Hodell *et al.*, 2005). Nuestros resultados son comparables, en tendencias y valores de TSM, a los registros de temperaturas reconstruidos en *O. faveolata* y *S. siderea*, en el Dry Tortugas National Park, Estrecho de la Florida (Flannery *et al.*, 2017).

El periodo II (1855-1910) muestra un calentamiento en la superficie del mar de CSM, con una

media anual de 26.86 °C y anomalías entre -0.56 y 0.43 °C.

Durante el periodo III (1910-1970), las TSM oscilaron entre 26.57 y 27.36 °C, con ciclos de calentamiento y enfriamiento. En este periodo se identificaron dos momentos de enfriamiento en el registro de coral (1918 y 1963) que coincidieron con anomalías frías de TSM reportadas en el suroeste del Golfo de México (del Monte-Luna *et al.*, 2015). El evento frío más destacado en el siglo XX en el registro de TSM_{Li/Ca} se observó a mediados de la década de 1960, que coincide con un periodo de enfriamiento previamente documentado en el Océano Atlántico Norte (Hodson *et al.*, 2014). Un Atlántico Norte más frío durante las décadas de 1960 a 1970 es evidente en varios conjuntos de datos de TSM del Atlántico Norte (Baines & Folland, 2007; Thompson *et al.*, 2010) y en las reconstrucciones realizadas para la Florida (DeLong *et al.*, 2014; Flannery *et al.*, 2017). A pesar de este evento, la media anual de temperatura se incrementó a 26.9 °C y las anomalías máximas alcanzaron los 0.47 °C.

Finalmente, el periodo IV (1970-2015) se caracterizó por una pronunciada tendencia de calentamiento anual, con una media anual de 27.05 °C y anomalías máximas de hasta 1.03 °C. La TSM en el área de estudio se incrementó de 26.70 °C en 1970 a 27.66 °C en el 2015, indicando un calentamiento de 0.77 °C en los últimos 50 años. Este resultado es comparable con la tendencia de calentamiento de la TSM (0.8 °C, entre 1975 y 2007) reportada para los Cayos de Florida (Kuffner *et al.*, 2015) y similar al valor de 0.4 °C para el mismo periodo en la reconstrucción de TSM en corales del océano Atlántico occidental (Tierney *et al.*, 2015).

Los resultados obtenidos fueron también compatibles con los reportes de la Oscilación Multidecadal Atlántica (AMO). AMO se define como la variabilidad teórica de la TSM del Océano Atlántico Norte y proporciona un índice de las anomalías a escala multidecadal. El registro de TSM_{Li/Ca}, derivado del análisis del núcleo de coral de *O. faveolata* de Cayo Santa

María, mostró una excelente concordancia con el índice AMO.

Conclusiones

En este trabajo se describe un registro temporal de 237 años de indicadores geoquímicos, obtenido de un núcleo de coral recolectado en Cayo Santa María, para interpretar variaciones en la temperatura superficial del mar. Este es el registro anual continuo más largo de *O. faveolata* en la región del Caribe que se ha publicado hasta la fecha.

La presencia de algas endolíticas en el interior del esqueleto de coral afectó el uso de indicadores como Li/Mg y Mg/Ca. De los indicadores estudiados, solo Li/Ca fue útil para reconstruir el registro multidecadal de TSM en CSM desde 1778 a 2015. El registro de TSM fue validado utilizando una base de datos independiente para el periodo 1880-2015 y corroboró las tendencias y valores reportadas para este periodo. El registro reflejó los periodos de calentamiento y enfriamiento reportados para el mar Caribe y el Golfo de México desde 1778 y mostró una concordancia excelente con el índice AMO. Se determinó un calentamiento de las aguas en CSM de 0.77 °C en los últimos 50 años.

Los resultados presentados en este estudio son la primera reconstrucción a largo plazo de la TSM en la zona costera de Cuba y brindan información relevante a nivel global para comprender los procesos de calentamiento en la región. Se propone la realización de estudios similares en más zonas de la plataforma para comprender los cambios de temperatura a largo plazo y a escala regional, así como su influencia sobre los arrecifes coralinos.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Programa de Cooperación Técnica del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) por el soporte proporcionado a esta investigación a través de los proyectos RLA/7/020, RLA/7/022 y RLA7025. Se agradece al Dr. Valentín

Zambrana Torres (Imágenes Diagnósticas de Mazatlán) por su cooperación con las imágenes de rayos-X digitales y, finalmente, a los laboratorios que colaboraron con la realización de los análisis incluidos en esta investigación: Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, CNRS, Gif-sur-Yvette, Francia; Laboratorio de Esclerocronología de Corales Escleractinios, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Puerto Morelos, México y el Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos, Cuba.

Declaraciones

Contribución de autores

Conceptualización, CMAH, PM; Metodología, PM, MGB, SDER, ED; Análisis de datos, CMAH, PM, MGB, JASC; Escritura – Original, CAH, JIHA, YHP; Escritura-Revisión y edición, CAH, YHP, JIHA, ACRS, JASC, PM, SDER; Administración del proyecto, CAH.

Financiamiento

El presente estudio fue financiado por el Programa de Cooperación Técnica del Organismo Internacional de Energía Atómica, a través de los proyectos RLA/7/020, RLA/7/022 y RLA7025; y el Programa Nacional "Tecnologías de aplicaciones nucleares, el láser, la óptica y la ultrasónica para producir y generalizar bienes y servicios", de la Agencia de Energía Nuclear y Tecnologías Avanzadas (AENTA), a través del proyecto MICATIN.

Conflicto de intereses

Los autores no tienen conflicto de intereses financieros o no financieros que declarar que sean relevantes para el contenido del manuscrito.

Comportamiento ético

Se han seguido todas las recomendaciones aplicables tanto internacionales, nacionales como institucionales relacionadas con el uso y manejo de animales para la investigación.

Permisos de muestreo

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

Referencias

- ACC-ICGC (Academia de Ciencias de Cuba-Instituto de Geodesia y Cartografía) (1990). *Estudio de los grupos insulares y zonas litorales del archipiélago cubano con fines turísticos: Cayos Francés, Cobos, Las Brujas, Ensenachos, Santa María*. Editorial Científico-Técnica, La Habana.
- Alpert, A.E., Cohen, A.L., Oppo, D.W., DeCarlo, T.M., Gaetani, G.A., Hernandez-Delgado, E.A., Winter, A., Gonneea, M.E. (2017). Twentieth century warming of the tropical Atlantic captured by Sr-U paleothermometry. *Paleoceanography*, 32(2), 146-160. doi: <https://doi.org/10.1002/2016PA002976>
- Baines, P. G., Folland, C. K. (2007). Evidence for a rapid global climate shift across the late 1960s. *J. Clim.*, 20(12), 2721-2744. doi: <https://doi.org/10.1175/JCLI4177.1>
- Bourdin, C., Douville, E., Genty, D. (2011). Alkaline-earth metal and rare-earth element incorporation control by ionic radius and growth rate on a stalagmite from the Chauvet Cave, Southeastern France. *Chem. Geol.*, 290(1-2), 1-11. doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2011.08.006>
- Cabral, Y., González-Díaz S. P. (2015). Evaluación de indicadores ecológicos en las comunidades de corales hermatípicos de la costa sur-central, provincia de Cienfuegos, Cuba. *Rev. Invest. Mar.*, 35(1), 38-56.
- Carricart-Ganivet, J. P., Lough, J. M., Barnes, D. J. (2007). Growth and luminescence characteristics in skeletons of massive Porites from a depth gradient in the central Great Barrier Reef. *J. Exp. Mar. Bio. Ecol.*, 351(1-2), 27-36. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2007.05.038>
- Cuny-Guirriec, K., Douville, E., Reynaud, S., Allemand, D., Bordier, L., Canesi, M., Mazzoli, C., Taviani, M., Canese, S., McCulloch, M., Trotter, J., Rico-Esenaro, S.D., Sánchez-Cabeza, J.A., Ruiz-Fernández, A.C., Carricart-Ganivet, J.P., Scott, P. M., Sadokov, A., Montagna,

- P. (2019). Coral Li/Mg thermometry: Caveats and constraints. *Chem. Geol.*, 523, 162-178. doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2019.03.038>
- DeCarlo, T.M., Gaetani, G.A., Cohen, A.L., Foster, G. L., Alpert, A.E., Stewart, J.A. (2016). Coral Sr-U thermometry. *Paleoceanography*, 31(6), 626-638. doi: <https://doi.org/10.1002/2015PA002908>
- Cruz-Piñón, G., Carricart-Ganivet, J.P., Espinoza-Avalos, J. (2003). Monthly skeletal extension rates of the hermatypic corals *Montastraea annularis* and *Montastraea faveolata*: Biological and environmental controls. *Mar Biol*, 143, 491-500.
- del Monte-Luna, P., Villalobos, H., Arreguín-Sánchez, F. (2015). Variability of sea surface temperature in the southwestern Gulf of Mexico. *Cont. Shelf Res.*, 102, 73-79. doi: <https://doi.org/10.1016/j.csr.2015.04.017>
- DeLong, K.L., Flannery, J.A., Maupin, C.R., Poore, R.Z., Quinn, T.M. (2011). A coral sr/ca calibration and replication study of two massive corals from the gulf of mexico. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 307(1-4), 117-128. doi: <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2011.05.005>
- DeLong, K.L., Flannery, J.A., Poore, R.Z., Quinn, T. M., Maupin, C.R., Lin, K., Shen, C.C. (2014). A reconstruction of sea surface temperature variability in the southeastern Gulf of Mexico from 1734 to 2008 C.E. using cross-dated Sr/Ca records from the coral *Siderastrea siderea*. *Paleoceanography*, 29(5), 403-422. doi: <https://doi.org/10.1002/2013PA002524>
- Deser, C., Phillips, A.S. y Alexander, M.A. (2010). Twentieth century tropical sea surface temperature trends revisited. *Geophys. Res. Lett.*, 37(10), L10701. doi: <https://doi.org/10.1029/2010GL043321>
- Ferrer Rodríguez, V.M., González-Díaz, S.P., Hernández-Fernández, L., Siciliano, D., Bretos, F., April, A., Huges, K., Santoro, A. (2016). Salud de las comunidades de corales en arrecifes de Jardines de la Reina - golfo de Ana Maria, región sur central de Cuba. *Rev. Invest. Mar.*, 36(1), 34-53.
- Flannery, J.A., Richey, J.N., Thirumalai, K., Poore, R.Z., DeLong, K.L. (2017). Multi-species coral Sr/Ca-based sea-surface temperature reconstruction using *Orbicella faveolata* and *Siderastrea siderea* from the Florida Straits. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 466, 100-109. doi: <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2016.10.022>
- Flannery, J.A., Richey, J.N., Toth, L.T., Kuffner, I.B., Poore, R.Z. (2018). Quantifying uncertainty in Sr/Ca-Based estimates of SST from the coral *Orbicella faveolata*. *Paleoceanogr. Paleoclimatology.*, 33(9), 958-973. doi: <https://doi.org/10.1029/2018PA003389>
- Hathorne, E.C., Felis, T., Suzuki, A., Kawahata, H., Cabioch, G. (2013). Lithium in the aragonite skeletons of massive Porites corals: A new tool to reconstruct tropical sea surface temperatures. *Paleoceanography*, 28(1), 143-152. doi: <https://doi.org/10.1029/2012PA002311>
- Helmle, K.P., Dodge, R.E., Swart, P.K., Gledhill, D.K., Eakin, C.M. (2011). Growth rates of Florida corals from 1937 to 1996 and their response to climate change. *Nat. Commun.*, 2(1), 215. doi: <https://doi.org/10.1038/ncomms1222>
- Hodell, D.A., Brenner, M., Curtis, J.H., Medina-González, R., Ildefonso-Chan Can, E., Albornaz-Pat, A., Guilderson, T.P. (2005). Climate change on the Yucatan Peninsula during the Little Ice Age. *Quat. Res.*, 63(2), 109-121. doi: <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2004.11.004>
- Hodson, D.L.R., Robson, J.I., Sutton, R.T. (2014). An anatomy of the cooling of the North Atlantic ocean in the 1960s and 1970s. *J. Clim.*, 27(21), 8229-8243. doi: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00301.1>
- Huang, B., Liu, C., Banzon, V., Freeman, E., Graham, G., Hankins, B., Smith, T., Zhang, H.-M. (2020). Improvements of the Daily Optimum Interpolation Sea Surface Temperature (DOISST) Version 2.1. *J. Clim.*, 34(8), 2923-2939. doi: <https://doi.org/10.1175/jcli-d-20-0166.1>
- IPCC (Grupo Interbubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático) (2018). Resumen para responsables de políticas. En V. Masson-Delmontte, P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis,

- E. Lonny, T. Maycock, M. Tignor y T. Waterfield (eds.) *Calentamiento de 1,5°C, Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales y las trayectorias correspondientes que deberían seguir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, en el contexto del reforzamiento de la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, el desarrollo sostenible y los esfuerzos por erradicar la pobreza*.
- Kuffner, I. B., Lidz, B.H., Hudson, J.H., Anderson, J.S. (2015). A Century of Ocean Warming on Florida Keys Coral Reefs: Historic In Situ Observations. *Estuaries and Coasts*, 38, 1085-1096. doi: <https://doi.org/10.1007/s12237-014-9875-5>
- Kuffner, I.B., Roberts, K.E., Flannery, J.A., Morrison, J.M., Richey, J.N. (2017). Fidelity of the Sr/Ca proxy in recording ocean temperature in the western Atlantic coral *Siderastrea siderea*. *Geochemistry, Geophys. Geosystems*, 18(1), 178-188. doi: <https://doi.org/10.1002/2016GC006640>
- Lizcano-Sandoval, L.D., Marulanda-Gómez, Á., López-Victoria, M., Rodríguez-Ramírez, A. (2019). Climate Change and Atlantic Multidecadal Oscillation as Drivers of Recent Declines in Coral Growth Rates in the Southwestern Caribbean. *Front. Mar. Sci.*, 6, 38. doi: <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fmars.2019.00038>
- McPhaden, M.J., Zebiak, S.E., Glantz, M.H. (2006). ENSO as an integrating concept in earth science. *Science*, 314(5806), 1740-1745. doi: <https://doi.org/10.1126/science.1132588>
- Montagna, P., McCulloch, M., Douville, E., López Correa, M., Trotter, J., Rodolfo-Metalpa, R., Dissard, D., Ferrer-Pagès, C., Frank, N., Freiwald, A., Goldstein, S., Mazzoli, C., Reynaud, S., Rüggeberg, A., Russo, S., Taviani, M. (2014). Li/Mg systematics in scleractinian corals: Calibration of the thermometer. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 132, 288-310. doi: <https://doi.org/10.1016/j.gca.2014.02.005>
- Rayner, N.A., Parker, D.E., Horton, E.B., Folland, C.K., Alexander, L.V., Rowell, D.P., Kent, E.C., Kaplan, A. (2003). Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 108(D14), 4407. doi: <https://doi.org/10.1029/2002jd002670>
- Rico-Esenaro, S.D., Sánchez-Cabeza, J.A., Carricart-Ganivet, J.P., Montagna, P., Ruiz-Fernández, A.C. (2019). Uncertainty and variability of extension rate, density and calcification rate of a hermatypic coral (*Orbicella faveolata*). *Sci. Total Environ.*, 650(Pt 1). doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.397>
- Sanchez-Cabeza, J.A., Rico-Esenaro, S.D., Corcho-Alvarado, J.A., Röllin, S., Carricart-Ganivet, J.P., Montagna, P., Ruiz-Fernández, A.C., Cearreta, A. (2021). Plutonium in coral archives: A good primary marker for an Anthropocene type section. *Sci. Total Environ.*, 771(13), 145077. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145077>
- Thompson, D.W.J., Wallace, J.M., Kennedy, J.J., Jones, P.D. (2010). An abrupt drop in Northern Hemisphere sea surface temperature around 1970. *Nature*, 467, 444-447. doi: <https://doi.org/10.1038/nature09394>
- Tierney, J.E., Abram, N.J., Anchukaitis, K.J., Evans, M.N., Giry, C., Kilbourne, K.H., Saenger, C.P., Wu, H.C., Zinke, J. (2015). Tropical sea surface temperature for the past four centuries reconstructed from coral archives. *Paleoceanography*, 30. doi: [10.1002/2014PA002717](https://doi.org/10.1002/2014PA002717)
- Ulmo-Díaz, G., Casane, D., Bernatchez, L., González-Díaz, P., Apprill, A., Castellanos-Gell, J., Hernández-Fernández, L., García-Machado, E. (2018). Genetic differentiation in the mountainous star coral *Orbicella faveolata* around Cuba. *Coral Reefs*, 37, 1217-1227. doi: <https://doi.org/10.1007/s00338-018-1722-x>

Anexos

Tabla S1. Ecuaciones (Indicador geoquímico = $a + b * TSM$) para la estimación de temperaturas en CSM a partir de modelos utilizados en estudios publicados previamente para *O. faveolata*.

Especie	Región	a	b	Referencia
Sr/Ca				
<i>O. faveolata</i>	Bocana, Laguna Arrecifal Puerto Morelos (BOC)	9.71	-0.017	(Rico-Esenaro, 2020)
<i>O. faveolata</i>	Isla Tortuga, Estrecho de la Florida (EF)	10.205	-0.039	(Flannery <i>et al.</i> , 2018)
Multi-species (<i>Orbicella</i> , <i>Pocillopora</i> , <i>Diploria</i>)	Múltiples sitios en el Atlántico Tropical (MAT)	12.42	-0.12	(Alpert <i>et al.</i> , 2017)
Li/Mg				
<i>O. faveolata</i>	Bocana, Laguna Arrecifal Puerto Morelos (BOC)	3.15	-0.06	(Rico-Esenaro, 2020)
Sr-U				
<i>O. faveolata</i>	Bocana, Laguna Arrecifal Puerto Morelos (BOC)	2.72	-0.10	(Rico-Esenaro, 2020)
Multi-species (<i>Orbicella</i> , <i>Pocillopora</i> , <i>Diploria</i>)	Múltiples sitios en el Atlántico Tropical	11.54	-0.09	(Alpert <i>et al.</i> , 2017)
Li/Ca				
Porites	Indo-Pacífico	14.4	-0.31	(Hathorne <i>et al.</i> , 2013)

Tabla S2. Valores del coeficiente de correlación de Pearson entre las concentraciones elementales, los indicadores geoquímicos y la Temperatura Superficial del Mar en Cayo Santa María reconstruida a partir de la base de datos de TSM₁₉₈₂₋₂₀₁₅. (*) Valores significativos ($p < 0.05$).

		Sr-U	Li/Ca	Mg/Ca	Sr/Ca	U/Ca	Li/Mg
Sr-U	Pearson Corr.	1					
Li/Ca	Pearson Corr.	-0.130	1				
Mg/Ca	Pearson Corr.	0.054	-0.424	1			
Sr/Ca	Pearson Corr.	0.801	0.066	0.054	1		
U/Ca	Pearson Corr.	-0.129	0.299	0.010	0.489	1	
Li/Mg	Pearson Corr.	-0.0547	0.530	-0.984	-0.015	-0.028	1
TSM ₁₉₈₂₋₂₀₁₅	Pearson Corr.	0.066	-0.677*	0.519*	-0.111	-0.281	-0.577*

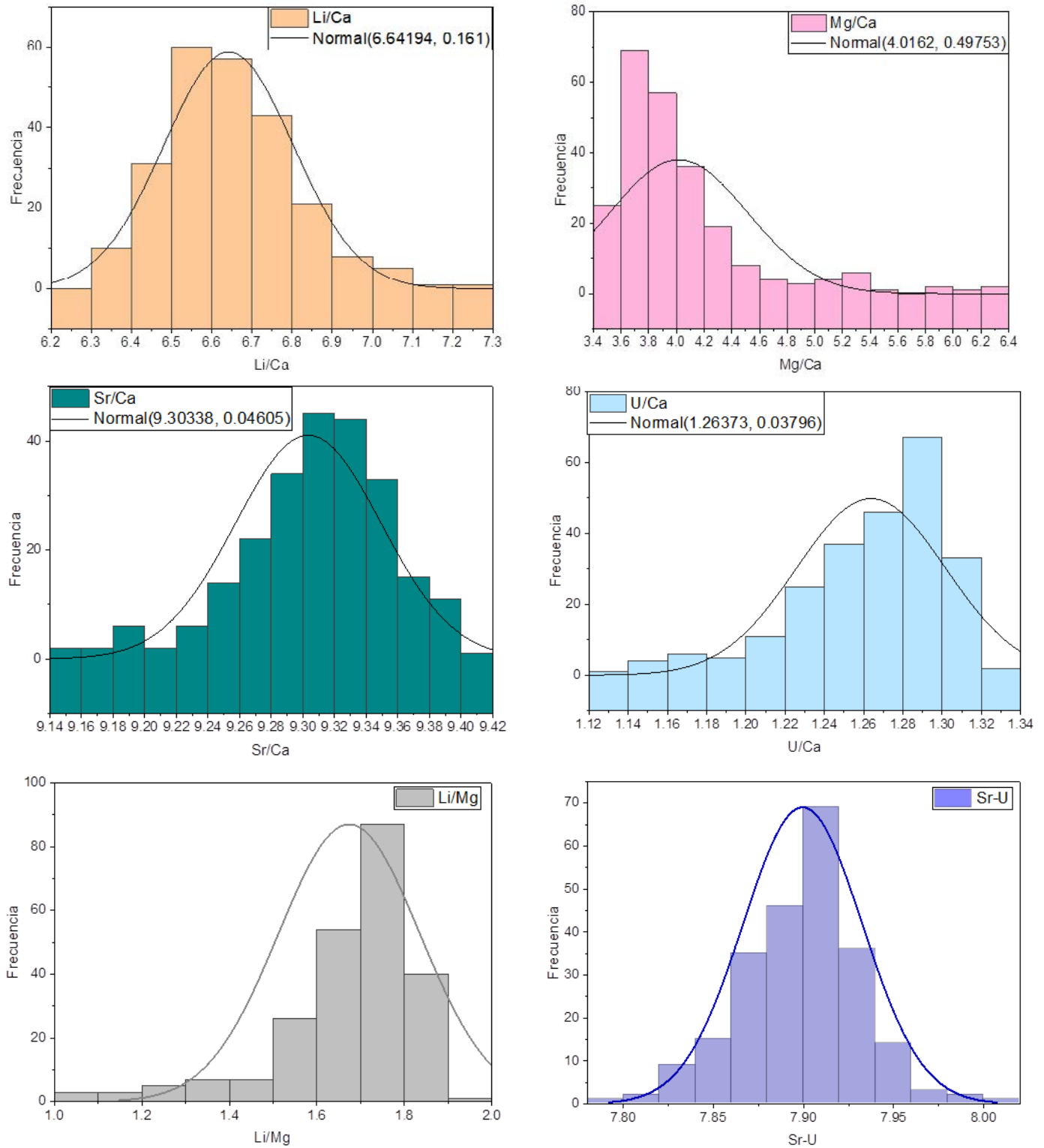


Fig. S1. Distribución de frecuencias para Li/Ca, Mg/Ca, Sr/Ca, U/Ca, Li/Mg y Sr-U en el núcleo de coral *O. faveolata* CSM1, recolectado en Cayo Santa María, Cuba.