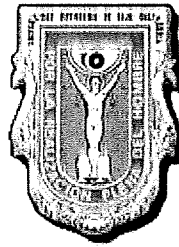


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS**



**RESPUESTA DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL MAR A
CAMBIOS EN LA CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA REGISTRADA
EN CORALES DEL GOLFO DE MÉXICO**

T E S I S

**QUE PARA CUBRIR PARCIALMENTE LOS REQUISITOS NECESARIOS
PARA OBTENER EL GRADO DE**

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN OCEANOGRAFIA COSTERA

PRESENTA

CONSTANZA RICAURTE VILLOTA

ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, MEXICO

ENERO de 2008

FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS

POSGRADO EN OCEANOGRAFIA COSTERA

**RESPUESTA DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL MAR A
CAMBIOS EN LA CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA REGISTRADA
EN CORALES DEL GOLFO DE MÉXICO**

T E S I S

QUE PARA CUBRIR PARCIALMENTE LOS REQUISITOS NECESARIOS
PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS

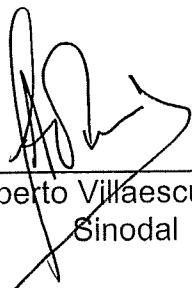
PRESENTA

CONSTANZA RICAURTE VILLOTA

Aprobada por:



Dr. José Domingo Carriquiry Beltrán
Presidente del jurado



Dr. Julio Alberto Villaescusa Celaya
Sinodal



Dr. Guillermo Horta Puga
Sinodal

DEDICATORIA

Este trabajo esta dedicado a mi Familia por su apoyo incondicional y su amor, que me ha permitido que a pesar de la distancia y las muchas pruebas yo pueda culminar esta importante etapa de mi vida.

A mis Padres que me enseñaron a luchar y creer que los sueños pueden hacerse realidad con esfuerzo, dedicación y perseverancia.

TABLA DE CONTENIDO

Índice de Figuras.....	iii
Agradecimientos.....	vi
Resumen.....	viii
CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
1.1 Objetivos.....	4
1.1.1 <i>Objetivo General.....</i>	<i>4</i>
1.1.2 <i>Objetivos Particulares.....</i>	<i>4</i>
1.2 Referencias.....	5
CAPITULO 2. RECONSTRUCCIÓN DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA DEL SUR DEL GOLFO DE MÉXICO: EVIDENCIAS GEOQUÍMICAS EN CORALES.....	9
Resumen.....	9
2.1 Introducción.....	10
2.2 Materiales y Métodos.....	12
2.2.1 <i>Área de estudio.....</i>	<i>12</i>
2.2.2 <i>Colecta y tratamiento de limpieza del núcleo de coral.....</i>	<i>15</i>
2.2.3 <i>Análisis Geoquímico.....</i>	<i>16</i>
2.2.4 <i>Cuantificación de las razones geoquímicas de Sr/Ca y Mg/Ca mediante ICP-AES.....</i>	<i>17</i>
2.2.5 <i>Análisis de datos.....</i>	<i>18</i>
2.3 Resultados y Discusión.....	19
2.3.1 <i>Variabilidad Interanual de Sr/Ca</i>	<i>21</i>
2.3.2 <i>Variabilidad Interdecadal de Sr/Ca.....</i>	<i>24</i>

2.4 Conclusiones.....	31
2.5 Referencias.....	32
CAPITULO 3. PARAMETROS DE CRECIMIENTO DE <i>Montastraea faveolata</i> COMO TRAZADORES DE CONDICIONES AMBIENTALES EN EL SUR DEL GOLFO DE MEXICO.....	38
Resumen.....	38
3.1 Introducción.....	39
3.2 Materiales y Métodos.....	41
3.3 Resultados y Discusión.....	45
<i>3.3.1 Tasa de Crecimiento esqueletal.....</i>	<i>45</i>
<i>3.3.2 Densidad esqueletal.....</i>	<i>48</i>
<i>3.3.3 Tasa de calcificación.....</i>	<i>50</i>
<i>3.3.4 Crecimiento de coral y la circulación atmosférica.....</i>	<i>52</i>
3.4 Conclusiones.....	56
3.5 Referencias.....	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Área de estudio, mostrando el Sistema Arrecifal Veracruzano, zona de colecta del núcleo de <i>Montastraea faveolata</i> , utilizado en este trabajo (Modificada de HORTA-PUGA, 2000).....	14
Figura 2.2. Registro de la razón molar Sr/Ca (mmol mol^{-1}) de <i>Montastraea faveolata</i> del SAV (a) y registro de temperatura superficial del mar (b) obtenido de la base de datos ERSST.v2 (Smith y Reynolds, 1994), con media móvil de 13 meses para cada uno.....	20
Figura 2.3. Análisis espectral Multi Taper (MTM) (Mann y Lees, 1996) de las anomalías desestacionalizadas de la razón molar Sr/Ca de <i>Montastraea faveolata</i> del SAV para el periodo de 1842 - 2002. N.S. corresponde a los niveles de significancia de 50, 90 y 95%.....	21
Figura 2.4. Comparación entre las frecuencias interanuales (Filtro de pasabanda de 2 a 7 años) de las anomalías desestacionalizadas de Sr/Ca del SAV y de las anomalías TSM de la Región de El Niño 3.4 (a). Correlación móvil de 7 años entre los dos registros (b). Se muestra el nivel de significancia de la correlación.....	23
Figura 2.5. Comparación entre las frecuencias interdecadales (filtro de paso bajo, ventana de 10 años) de las anomalías desestacionalizadas de Sr/Ca del SAV para invierno y el índice PDO de invierno (a). Correlación móvil de 21 años entre los dos registros (b). Se muestra el nivel de significancia de la correlación.....	26

Figura 2.6. Comparación entre las frecuencias interdecadales (Filtro de paso bajo de 10 años) de las anomalías desestacionalizadas de Sr/Ca del SAV para invierno y el patrón PNA de invierno (a). Correlación móvil de 11 años entre los dos registros (b). Se muestra el nivel de significancia de la correlación.....**27**

Figura 2.7. Comparación entre las frecuencias interdecadales (Filtro de paso bajo de 10 años) de las anomalías desestacionalizadas de Sr/Ca del SAV para invierno y el índice NAO de invierno (a). Correlación móvil de 21 años entre los dos registros (b). Se muestra el nivel de significancia de la correlación.....**30**

Figura 3.1. Imagen digital de rayos x de una laja de *Montastraea faveolata* del SAV, mostrando la cuña escalonada de aragonita (estándar de aragonita) y las barras de aluminio utilizadas para la corrección del efecto tacón.....**42**

Figura 3.2. Comparación de las anomalías de tasa de crecimiento esquelético anual de *Montastraea faveolata* del SAV y las anomalías de Sr/Ca de verano. Las barras grises muestran los periodos en los que las coincidencias entre las dos señales aumentan.....**47**

Figura 3.3. Comparación de las anomalías de densidad esquelético anual de *Montastraea faveolata* del SAV con las anomalías de Sr/Ca de verano. Las barras grises muestran los periodos en que las coincidencias entre las dos señales aumentan.....**49**

Figura 3.4. Comparación de las anomalías de tasa de calcificación anual de *Montastraea faveolata* del SAV con las anomalías de Sr/Ca de verano. Las barras grises muestran los periodos en que las coincidencias entre las dos señales aumentan.....**51**

Figura 3.5. Comparación de las anomalías de tasa de crecimiento esquelético anual de *Montastraea faveolata* del SAV con el índice PNA de invierno. La variación de baja frecuencia de ambos registros se muestra utilizando una media móvil de 11 años. Las barras grises muestran los periodos en que las coincidencias entre las dos señales aumentan.....**53**

Figura 3.6. Comparación de las anomalías de tasa de crecimiento esquelético anual de *Montastraea faveolata* del SAV con el índice NAO de invierno. La variación de baja frecuencia de ambos registros se muestra utilizando una media móvil de 11 años. Las barras grises muestran los periodos en que las coincidencias entre las dos señales aumentan.....**54**

Figura 3.7. Comparación de las anomalías de tasa de crecimiento esquelético anual de *Montastraea faveolata* del SAV con el índice PDO de invierno. La variación de baja frecuencia de ambos registros se muestra utilizando una media móvil de 11 años. Las barras grises muestran los periodos en que las coincidencias entre las dos señales aumentan.....**55**

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. José Domingo Carriquiry, por creer en mí y acogerme como su estudiante, y hacer de mi maestría una experiencia enriquecedora tanto en lo profesional como en lo personal. Por recordarme que con trabajo, esfuerzo y perseverancia se logra ser una profesional de la más alta calidad. Por ofrecerme su valiosa amistad y mostrarme que se puede separar lo personal de lo profesional. Por permitirme participar en sus proyectos y con ello poder culminar mi formación.

Al Dr. Julio Alberto Villaescusa por compartir sus conocimientos, su paciencia y dedicación que han hecho de mi una mejor profesional y persona. Por creer en mí y motivarme a seguir adelante. Además por ofrecerme su valiosa amistad y hacer que los momentos más difíciles hayan sido llevaderos.

Al Dr. Guillermo Horta por sus comentarios y aportes, claves en el entendimiento del área de estudio y el análisis de los resultados obtenidos. Por su amistad y su alegría contagiosa que nos ha permitido pasar momentos felices.

A Eduardo Santamaría por que gracias a su ayuda llegué al programa de postgrado al aceptar ser mi tutor, por aconsejarme y apoyarme cuando decidí darle un giro a mi área de investigación. Por apoyarme en el trámite y gestionar la beca de postgrado.

A Juan Pablo D'Olivo, Pedro Castro y Eliel Ramírez por su apoyo durante el trabajo de laboratorio.

A mis profesores, por que todos y cada uno de ellos han hecho parte del conjunto de conocimientos y experiencias que me deja esta maestría.

A mis compañeros de maestría y en especial a mis amigos Gaby, Monse, Ada, Astrid, Pancho, Leslie, Edith, Beto, Arturo, Claudia y el Vale, mis hermanos en Ensenada, por que bien se dice que los amigos son la familia que escogemos, por su apoyo y preocupación, por los momentos de risas, por los abrazos, por las palabras de aliento y por recibirme como una mexicana más.

A mi Mamá y a mi hermana Cristi por su preocupación y apoyo, por las tantas veces que hicieron el largo viaje desde Colombia solo para demostrarme que no estaba sola en esta lucha y darme su amor.

A Carlos por hacerme la vida más fácil, por cuidarme y soportar cada uno de mis momentos difíciles durante estos 2 años y medio de duro trabajo. Por su cariño y compañía que estando lejos de mis seres queridos hacen de Ensenada nuestro hogar.

Este trabajo fue realizado gracias a la beca CONACYT de postgrado, al proyecto CONACYT "Paleoquímica y Paleoclimatología Reciente del Atlántico Mexicano: Reconstrucción ambiental con base en el registro geoquímico de corales arrecifales" - Sep-2004-CO1-46814 y CONABIO "Monitoreo del Bentos, nutrientes e isótopos en relación a la salud arrecifal de las áreas naturales protegidas del norte de Quintana Roo con mayor vulnerabilidad al cambio de fase arrecifal: I fase – 8479.

RESUMEN

Este trabajo es el primer registro largo (160 años), de alta resolución, del paleotermómetro de Sr/Ca coralino como trazador de la temperatura superficial del mar (TSM) en el sur del Golfo de México, mostrando su alta fidelidad a pesar la alta turbidez y condiciones dinámicas que presenta la zona de estudio. El análisis de las anomalías de la razón Sr/Ca de *Montastraea faveolata* del Sistema Arrecifal Veracruzano (SAV), muestra que estas responden positivamente en la escala interanual al forzamiento de El Niño (ENSO) y en la escala decadal – interdecadal a los cambios atmosféricos generados por la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO), Patrón Pacífico/Norte América (PNA) y la Oscilación del Atlántico Norte (NAO). El paleotermómetro coralino de Sr/Ca del SAV, revela una respuesta inversa de la TSM, durante la fase positiva la TSM muestra anomalías positivas, al patrón PNA registrado en corales del norte del Golfo de México, lo que sugiere que el GdM esta dividido en dos regiones con características oceanográficas y climáticas diferentes.

Los parámetros de crecimiento de *Montastraea faveolata* del SAV (tasa de crecimiento, densidad y tasa de calcificación) también mostraron estar correlacionados con la TSM a diferentes escalas espaciales y temporales. La tasa de crecimiento esquelético (mm año^{-1}) del coral, se incrementó durante la fase positiva (en invierno) del PNA, NAO y PDO. Esto significa que el crecimiento anual responde a la extrema variabilidad de largo plazo de la TSM en la región (en escalas decadal - multidecadal). La cercana relación entre la tasa de crecimiento con la variabilidad del PNA, NAO y PDO, sugiere que los corales responden no solo a cambios en la TSM sino a las amplias condiciones climáticas resultantes de los cambios en circulación atmosférica que afectan el sur del Golfo de México. Estos resultados indican también que es posible reconstruir la variabilidad histórica del PNA, NAO y PDO en escalas de tiempo que exceden las de los registros instrumentales.

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN GENERAL

En los últimos años, la paleoceanografía se ha convertido en uno de los campos de la ciencia que ha tomado fuerza, debido a su aporte en el conocimiento de las condiciones pasadas del océano, como parte de un sistema climático en el que las interacciones océano-atmósfera son claves. Las variaciones del océano en épocas remotas son importantes de conocer y entender, con el fin de dilucidar los efectos naturales y antropogénicos dentro del contexto de la problemática actual del cambio climático global.

Numerosos estudios han mostrado que el clima del planeta ha cambiado de manera significativa en el último siglo, en parte por causas naturales, pero principalmente como consecuencia de las actividades humanas. Las implicaciones de estos cambios para el ser humano y para los ecosistemas marinos, en especial, son extremadamente importantes desde el punto de vista económico, social, ambiental, etc., ya que debido a estas variaciones se han modificado los patrones de lluvias, la severidad y periodicidad de ciclones tropicales, entre otros fenómenos ambientales, los cuales podrían llegar a niveles catastróficos para la humanidad (se estima que el 50% de la población mundial vive a menos de 60 km. de la costa) (IPCC, 2001).

En este contexto, las señales grabadas en los corales se han convertido en herramientas útiles para el conocimiento de zonas oceánicas tropicales, en las cuales los registros instrumentales son limitados (Gagan *et al.*, 2000, pero que han sido reconocidas como la región mas importante en las interacciones océano-atmósfera a nivel global (Chang *et al.*, 2006). Los esqueletos de coral proveen un registro inalterado de las condiciones físicas y químicas del océano en la época de su formación (Druffel, 1997), y por su abundancia en la zona tropical y crecimiento (existen colonias que llegan a crecer de manera continua hasta por varias centenas de años) los corales proveen la posibilidad de hacer

reconstrucciones largas y confiables de la variabilidad climática y ambiental para regiones tropicales. (Gagan *et al.* 2000).

Algunos géneros de corales, como *Porites*, han permitido excelentes reconstrucciones paleoceanográficas del Pacífico, mientras que para el Atlántico todavía se está evaluando cuales son las especies que presentan mejores resultados. Por su amplia distribución geográfica en el Atlántico occidental tropical y subtropical y en especial en el Gran Caribe, *Montastraea* es el principal género que está siendo utilizado para reconstrucciones climáticas (Watanabe *et al.*, 2002). En particular, para el Caribe mexicano sólo existe un estudio sobre la reconstrucción de la contaminación por plomo desde 1960 al 2000 usando este género (Medina-Elizalde *et al.*, 2002), pero no existe ningún trabajo para la región del sur del Golfo de México (GdM). La mayoría de los estudios con este género en el resto del Atlántico occidental, se han enfocado en la reconstrucción de la temperatura superficial del mar (TSM) (Slowey y Crowley, 1995; Watanabe *et al.*, 2001 y 2002; Swart *et al.*, 2002; Draschba *et al.*, 2000 y Smith *et al.*, 2006).

Debido al acoplamiento del sistema océano-atmósfera, que convierte al océano en un importante regulador del clima, la TSM se constituye en un parámetro climático clave. En consecuencia, conocer su variabilidad histórica permite revelar información importante sobre el comportamiento de la temperatura, el cambio climático y las consecuencias de diversos fenómenos ambientales como el ENSO (Tudhope *et al.*, 2001). Reconstrucciones de la TSM a partir de los esqueletos coralinos han empezado a revelar aspectos importantes sobre la variabilidad climática y han sido utilizados para calibrar y evaluar el desempeño de los modelos climáticos a largo plazo.

En corales, la TSM puede ser reconstruida utilizando trazadores geoquímicos como la razón Sr/Ca (Smith *et al.*, 1979; Beck *et al.*, 1992; Marshall y McCulloch, 2002), Mg/cá (Mitsugushi *et al.*, 1996), U/Ca (Shen y Dunbar, 1995) y el $\delta^{18}\text{O}$ (Weber y Woodhead, 1972, Carriquiry *et al.*, 1988 y 1994); o a través del estudio de las bandas de densidad (Knutson *et al.*, 1972;

Carricart-Ganivet y Merino, 2001; Cruz-Piñón *et al.*, 2003; Carricart-Ganivet, 2004). Con las bandas de densidad se definen parámetros como tasa de crecimiento, tasa de calcificación y densidad esquelética. No obstante, además de estar influenciados por la TSM, estos parámetros también reflejan cambios en luz y gradientes ambientales (Dodge y Vaisnys, 1980; Lough y Barnes, 1997 y 2000).

Hasta hoy día, los estudios enfocados a entender la variabilidad climática del sur del GdM son extremadamente escasos. Por lo tanto, se desconoce la respuesta climática regional a los forzamientos globales, como la Oscilación del Atlántico Norte (NAO) (Hurrell *et al.*, 2003, el patrón Pacífico/Norteamericano (PNA) (Wallace y Gutzler, 1981), la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) (Mantua *et al.*, 1997) y El Niño Oscilación del Sur (ENSO) o el efecto conjunto de todos ellos.

Algunos estudios de registros coralinos han mostrado el efecto de la NAO y PNA sobre la TSM del Atlántico, por ejemplo las anomalías de densidad esquelética de época de invierno de *D. labyrinthiformis* de Bermudas se correlacionaron con las anomalías de TSM sobre escalas de tiempo interanuales y decadales, las cuales a su vez responden a variaciones en la NAO (Cohen *et al.*, 2004). Por su parte, cambios en el patrón PNA hacia una fase positiva, coincidieron con una disminución de temperatura del aire en época de invierno en las costas de Texas – Louisiana (Flower Garden Banks) que ha sido registrada por *Montastraea annularis* con una disminución en la tasa de crecimiento (Slowey y Crowley, 1995).

El efecto de otros tipos de forzamientos climáticos de escala global en la región no ha sido explorado. Por ejemplo, la influencia del ENSO sobre la TSM en la zona del Caribe mexicano y el GdM o incluso en latitudes más altas sobre el Atlántico Occidental es prácticamente desconocida, aunque se ha documentado que el blanqueamiento masivo de corales en el Caribe son consecuencia de los eventos ENSO de 1986-87 y 1990-91 (Roberts, 1990).

También se ha propuesto Además que el fenómeno ENSO puede influenciar el patrón PNA (Horel y Wallace, 1981).

Esto contrasta con el Pacífico, donde el uso de proxies coralinos ha documentado el efecto a largo plazo de los eventos ENSO sobre la variabilidad climática (Cole *et al.*, 1993, Boiseau *et al.*, 1998 y Linsley *et al.*, 2004, entre otros). Esto debido al gran interés en la comprensión de este fenómeno y su impacto tanto sobre el clima del planeta como en las actividades humanas.

Esta tesis esta dividida en dos capítulos: el capítulo 2 muestra la reconstrucción de la variabilidad climática, del sur del Golfo de México, empleando la razón Sr/Ca como trazador de la TSM de *Montastraea faveolata* colectado en el sistema arrecifal Veracruzano (SAV). Las anomalías de Sr/Ca fueron utilizadas para investigar los efectos de fenómenos de variabilidad climática interanual como ENSO y de largo plazo, tales como el PNA, la PDO y la NAO en el sur del Golfo de México. El capítulo 3 analiza los parámetros de crecimiento de *Montastraea faveolata* como trazadores de condiciones ambientales del sur del GdM, específicamente cambios en la TSM, y a largo plazo a los forzamientos atmosféricos extratropicales.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo General

Estudiar la respuesta a largo plazo de la temperatura superficial del mar a cambios en la circulación atmosférica de escala regional, hemisférica y global registrada en corales del Golfo de México.

1.2.1 Objetivos Particulares

- a. Usar proxies (Sr/Ca y Mg/Ca) coralinos para la reconstrucción de la TSM.
- b. Estudio de las variaciones ambientales en los últimos 160 años.

- c. Caracterizar la respuesta térmica del océano, a cambios en la circulación atmosférica de diversas escalas espaciales y temporales como la NAO, PNA, ENSO, entre otros.
- d. Determinar el efecto de los cambios en la TSM sobre el crecimiento de los corales.

1.2 Referencias

- Beck, J.W., R.L. Edwards, E. Ito, F.W. Taylor, J. Recy, F. Rougerie, P. Joannot y C. Henin. 1992. Sea-surface temperature from coral skeletal Strontium/Calcium ratios. *Science*. 257: 644 – 647.
- Boiseau, M., A. Julliet-Leclerc, P. Yiou, B. Salvat, P. Izadle y M. Guillaume. 1998. Atmospheric and oceanic evidences of El Niño-Southern Oscillation events in the south central Pacific Ocean from coral stable isotopic records over the last 137 years. *Paleoceanography* 13: 671 – 685.
- Carricart-Ganivet, J.P. 2004. Sea surface temperature and the growth of the West Atlantic reef-building coral *Montastraea annularis*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* doi:10.1016/j.jembe.2003.10.015.
- Carricart-Ganivet, J.P. y M. Merino. 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: 133 – 146.
- Carriquiry, J.D., M.J. Risk y H.P. Schwarcz. 1988. Timing and temperature record from stable isotopes of the 1982 -1983 El Niño warming event in Eastern Pacific corals. *Palaos* 3: 359 – 364.
- Carriquiry, J.D., M.J. Risk y H. Schwarcz. 1994. Stable isotope geochemistry of corals from Costa Rica as proxy indicator of the El Niño/Southern Oscillation (ENSO). *Geochimica et Cosmochimica Acta* 58: 335 – 351
- Chang P., T. Yamagata, P. Schopf, S.K. Behera, J. Carton, W.S. Kessler, G. Meyers, T. Qu, F. Schott, S. Shetye y S.-P. Xie. 2006. Climate fluctuations of tropical coupled systems – The role of ocean dynamics. *Journal of Climate* 19: 5122 - 5174.

- Cohen, A.L., S.R. Smith, M.S. McCartney y J. van Etten. 2004. How brain corals record climate: an integration of skeletal structure, growth and chemistry of *Diploria labyrinthiformis* from Bermuda. *Marine Ecology Progress Series* 271: 147 – 158.
- Cole, J.E., R.G. Fairbanks y G.T. Shen. 1993. Recent variability in the Southern Oscillation: isotopic results from a Tarawa Atoll coral. *Science* 260: 1790 – 1793.
- Cruz-Piñón, G., J.P. Carricart-Ganivet y J. Espinoza-Avalos. 2003. Monthly skeletal extension rates of the hermatypic corals *Montastraea annularis* and *Montastraea faveolata*: biological and environmental controls. *Marine Biology* 143: 491– 500.
- Dodge, R.E. y J.C. Lang. 1983. Environmental correlates of hermatypic coral (*Montastrea annularis*) growth on the East Flower Gardens Bank, northwest Gulf of Mexico. *Limnology and Oceanography* 28(2): 228 – 240.
- Dodge, R.E. y J. R. Vaisnys. 1980. Skeletal growth chronologies of recent and fossil corals. En: Skeletal growth of aquatic organisms. Biological records of environmental change. D. C. Rhoads y R.A. Lutz (Eds). Plenum Press. New York. Pp 493 – 517.
- Draschba, S., J. Patzold y G. Wefer. 2000. North Atlantic climate variability since AD 1350 recorded in $\delta^{18}\text{O}$ and skeletal density of Bermuda corals. *International Journal Earth Science* 88:733–741
- Druffel E. R. M.1997. Geochemistry of corals: Proxies of past ocean chemistry, ocean circulation and climate. *Proceedings of the National Academy of Science USA* 94: 8354 - 8361.
- Gagan M.K., Ayliffe L.K., Beck J.W., Cole J.E., Druffel E.R.M., Dunbar R.B. y Schrag D.P. 2000. New view of tropical paleoclimate from corals. *Quaternary Science Reviews* 19: 45-64.
- Horel, J.D. y M.J. Wallace. 1981. Planetary scale phenomenon associated with the southern oscillation. *Monthly Weather Review* 109: 813 - 829.
- Hurrell, J. W., Y. Kushnir, G. Ottersen y M. Visbeck. 2003. An Overview of the North Atlantic Oscillation. En: The North Atlantic Oscillation: Climatic Significance and

Environmental Impact. *Geophysical Monograph* 134. American Geophysical Union.

IPCC. 2001. *Tercer Informe de Evaluación: Cambio Climático 2001, la Base Científica*. OMM-PNUMA. 83 pp.

Knutson, D.W., R.W. Buddemeier y S.V. Smith. 1972. Coral chronometers: seasonal growth bands in reef corals. *Science* 177: 270 – 272.

Linsley, B.K., G.M. Wellington, D.P. Schrag, L. Ren, M.J. Salinger y A.W. Tudhope. 2004. Geochemical evidence from corals for changes in the amplitude and spatial pattern of South Pacific interdecadal climate variability over the last 300 years. *Climate Dynamics* 22: 1 – 11.

Lough, J.M. y D.J. Barnes. 1997. Several centuries of variation in skeletal extension, density and calcification in massive *Porites* colonies from the Great Barrier Reef: A proxy for seawater temperature and a background of variability against which to identify unnatural change. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 211: 29 – 67.

Lough, J.M. y D.J. Barnes. 2000. Environmental controls on growth of the massive coral *Porites*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 245: 225 – 243.

Mantua N.J., S.R. Hare, Y. Zhang, J.M. Wallace y R.C. Francis. 1997. A Pacific decadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bulletin of the American Meteorological Society* 78: 1069 - 1079.

Marshall, J.F. y M.T. McCulloch. 2002. An assessment of the Sr/Ca ratio in shallow water hermatypic corals as a proxy for sea surface temperature. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 66: 3263 - 3280.

Medina- Elizalde, M., G. Gold-Bouchot y V. Ceja-Moreno. 2002. Lead contamination in the Mexican Caribbean recorded by the coral *Montastraea annularis* (Ellis and Solander). *Marine pollution Bulletin* 44: 421 – 423.

Mitsuguchi, T., E. Matsumoto, O. Abe, T. Uchida y P. J. Izadle. 1996. Mg/Ca Thermometry in Coral Skeletons. *Science* 274: 961-963.

Roberts, L. 1990. Warm waters, bleached corals. *Science* 250: 213.

- Shen, G.T. y R.B. Dunbar. 1995. Environmental controls on uranium in reef corals. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 59: 2009 - 2024.
- Slowey, N.C. y T. Crowley. 1995. Interdecadal variability of Northern Hemisphere circulation recorded by Gulf of Mexico corals. *Geophysical Research Letters* 22: 2345 – 2348.
- Smith S.V., R.W. Buddemeier, R.C. Redalje y J.E. Houck. 1979. Strontium-calcium thermometry in coral skeletons. *Science* 204: 404 - 407.
- Smith, J.M., T.M. Quinn, K. P. Helmle y R. B. Halley. 2006. Reproducibility of geochemical and climatic signals in the Atlantic coral *Montastraea faveolata*. *Paleoceanography* 21: PA1010, doi: 10.1029/2005PA001187.
- Swart, P. K., H. Elderfield y M. J. Greaves. 2002. A high-resolution calibration of Sr/Ca thermometry using the Caribbean coral *Montastraea annularis*. *Geochemistry Geophysics Geosystems* 3(11): 8402, doi: 10.1029/2002GC000306.
- Tudhope, A.W., C. P. Chilcott, M. T. McCulloch, E. R. Cook, J. Chappell, R. M. Ellam, D. W. Lea, J. M. Lough y G. B. Shimmield. 2001. Variability in the El Niño-Southern Oscillation Through a Glacial-Interglacial Cycle. *Science* 291: 1511-1517.
- Wallace, J.M. y D. S. Gutzler. 1981. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter. *Monthly Weather Review* 109: 784 - 812.
- Watanabe, T., A. Winter y T. Oba. 2001. Seasonal changes in sea surface temperature and salinity during the Little Ice Age in the Caribbean Sea deduced from Mg/Ca and $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ratios in corals. *Marine Geology* 173: 21–35.
- Watanabe, T., A. Winter, T. Oba, R. Anzai y H. Ishioroshi. 2002. Evaluation of the fidelity of isotope records as an environmental proxy in the coral *Montastraea*. *Coral Reefs* 21:169 - 178.
- Weber, J.N. y P.M.J. Woodhead. 1972. Temperature dependence of oxygen-18 concentration in reef coral carbonates. *Journal of Geophysical Research* 77: 463 - 473.

CAPÍTULO 2

RECONSTRUCCIÓN DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA DEL SUR DEL GOLFO DE MÉXICO: EVIDENCIAS GEOQUÍMICAS EN CORALES

Resumen

Las condiciones climáticas del Golfo de México (GdM) se encuentran fuertemente influenciadas por la circulación atmosférica extratropical de gran escala, como son la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO), el patrón Pacífico/Norte América (PNA) y la Oscilación del Atlántico Norte (NAO). Aunque los registros de corales han sido ampliamente usados para el estudio de eventos climáticos tropicales como El Niño y la Oscilación del Sur (ENSO), a la fecha poco se conoce sobre la influencia de ENSO y estos fenómenos extratropicales sobre la zona sur del GdM. En este trabajo se presenta el primer registro largo (160 años), de alta resolución, del paleotermómetro de Sr/Ca coralino como trazador de la temperatura superficial del mar (TSM), mostrando su alta fidelidad a pesar de la dinámica y alta turbidez que presenta la zona de estudio. El análisis de las anomalías de la razón Sr/Ca de *Montastraea faveolata* del Sistema Arrecifal Veracruzano (SAV), muestra que estas responden en la escala interanual al forzamiento del ENSO y en la escala decadal – interdecadal a los cambios atmosféricos generados por la PDO, PNA y NAO. Las anomalías de Sr/Ca muestran una respuesta positiva de la TSM con estos forzamientos a largo plazo. El paleotermómetro coralino de Sr/Ca del SAV, revela una respuesta inversa de la TSM al patrón PNA registrado en corales del norte del Golfo de México, lo que sugiere que el GdM está dividido en dos regiones con características oceanográficas y climáticas diferentes.

2.1 Introducción

El océano tropical ha sido reconocido como la región mas importante en las interacciones océano-atmósfera a nivel global, por lo que el entendimiento de los cambios en el clima tropical constituye una información clave para entender la variabilidad climática a diferentes escalas de tiempo (Chang et al., 2006). El sur del Golfo de México (GdM), se encuentra en el límite norte de la zona tropical y poco se sabe acerca de la influencia que tienen fenómenos tropicales o extratropicales sobre su climatología.

Una de los modos de variabilidad climática extratropical más significativos que afecta el clima del Atlántico tropical, particularmente para la región del Caribe y el GdM, es el patrón Pacífico/Norteamericano (PNA) (Wallace y Gutzler, 1981). El PNA se caracteriza por cambios en el campo de altura geopotencial de la troposfera media, cuyos efectos se extienden desde el Pacífico central hasta el este de Norteamérica. La Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) a su vez ha sido identificada como uno de los forzamientos más importantes del sistema océano-atmósfera en el Pacífico Norte y Norte América a escala interdecadal (Trenberth y Hurrell, 1994; Mantua, 1997). La influencia de la PDO sobre el Atlántico se ha encontrado que esta relacionada con las teleconexiones con el PNA (Wallace y Gutzler, 1981; Trenberth y Hurrell, 1994; Latif y Barnett, 1996; Mantua et al, 1997).

Por su parte, la Oscilación del Atlántico Norte (NAO) es el patrón más prominente y recurrente de variabilidad atmosférica sobre latitudes medias y altas del Hemisferio Norte en el Océano Atlántico y Europa, sobre todo durante los meses de invierno (noviembre-abril). Este patrón se refiere a una redistribución de masa atmosférica entre el Ártico y el Atlántico subtropical, donde los balances de una fase a otra producen grandes cambios en la velocidad media y dirección del viento sobre el Atlántico (Hurrell *et al.*, 2003). Adicionalmente cambios en la NAO produce diferencias en el transporte de calor y humedad entre el Atlántico y los continentes vecinos, variaciones en la

intensidad y número de tormentas, y cambios en sus trayectorias y su temporalidad (Hurrell *et al.*, 2003). La influencia de la NAO sobre el Atlántico Noroccidental ha sido estudiada con ayuda de registros coralininos (densidad esquelética y Sr/Ca) de *Diploria labyrinthiformis*, encontrando que durante la fase positiva de la NAO la TSM es anormalmente cálida y viceversa (Cohen *et al.*, 2004).

El efecto de estos modos de variabilidad climática que muestran una influencia a nivel global, y que potencialmente producen consecuencias significativas en el clima a nivel regional, son poco conocidos en el GdM. Se ha demostrado que el análisis de las bandas de crecimiento de corales pueden revelar aspectos importantes sobre la variabilidad climática y son una de las pocas herramientas de reconstrucción climática de alta resolución para regiones tropicales, donde los registros instrumentales son notablemente cortos o inexistentes (Gagan *et al.*, 2000; Cole, 2003).

El paleotermómetro de Sr/Ca ha sido ampliamente utilizado para reconstruir la variabilidad de la TSM en regiones tropicales y extratropicales (Beck *et al.*, 1992; Marshall y McCulloch, 2002). El uso del trazador geoquímico de Sr/Ca en los esqueletos de coral ha mostrado la posibilidad de reconstruir la TSM con una precisión mejor que $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ (Beck *et al.*, 1992; deVilliers *et al.*, 1994; Shen *et al.*, 1996; Marshall y McCulloch, 2002), lo que permite ampliar los escasos registros climáticos para las zonas tropicales. Crowley *et al.* (1999) sugirieron que para utilizar los corales en el análisis del comportamiento climático a gran escala, es necesario demostrar que la TSM derivada de los paleotermómetros se correlaciona bien con las temperaturas locales, además de que esta debe ser comparable contra bases de datos independientes que incluyan una escala espacio-temporal mas amplia.

Aunque los registros coralininos han sido extensivamente empleados para estudiar eventos climáticos tropicales, tales como El Niño y la Oscilación del Sur (ENSO) y la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) (e.g. Carriquiry *et al.*, 1988,

1994, Linsley et al., 2000, 2004), poco se ha hecho para entender la influencia de fenómenos extratropicales como PNA y NAO sobre las regiones tropicales (e.g. Slowey y Crowley, 1995). En este estudio empleamos la señal de Sr/Ca en el esqueleto de coral *Montastraea faveolata* colectado en el sistema arrecifal Veracruzano (SAV), como un trazador de la temperatura superficial del mar (TSM), para investigar los efectos de fenómenos de variabilidad climática interanual como ENSO y de largo plazo, tales como el PNA, la PDO y la NAO en el sur del GdM.

2.2 Materiales y Métodos

2.2.1 Área de estudio

El sur del Golfo de México se encuentra delimitado entre aproximadamente los 18° y 23° N y los 86° y 96° W, esta zona abarca los estados de Veracruz, Tabasco, Campeche y Yucatán, e incluye el Banco de Campeche el cuál se considera una porción sumergida de la Península de Yucatán.

Oceanográficamente, el GdM se encuentra influenciado por la Corriente del Caribe, con los diversos nombres que toma en su trayecto. La circulación interna del Golfo esta dominada por dos giros uno de tipo ciclónico y otro anticiclónico, que se encuentran bien delimitados espacialmente; el giro ciclónico de la bahía de Campeche (BCCG) y el giro anticiclónico del Golfo oeste (WGAG). El WGAG se ha descrito como un giro muy energético que se desprende de la Corriente del Lazo, con diámetros promedio de 300 km y que presenta una trayectoria hacia el noroeste y centro principalmente, aunque con ciertas variaciones estacionales e interanuales (Cochrane, 1972; Zavala *et al.*, 2002). El BCCG se ha descrito como una circulación ciclónica semipermanente, la cuál probablemente es mantenida por el giro de esfuerzo del viento ciclónico sobre la Bahía (Vásquez De la Cerda, 1993; Zavala *et al.*, 2002).

La salinidad superficial muestra un gradiente horizontal desde el suroeste hacia el noroeste, con valores que van desde 35.8 a 36.6 en el extremo interno de la Península de Yucatán (Nowlin, 1972). La TSM muestra un amplio gradiente espacial y una gran variabilidad estacional con temperaturas máximas en verano (Agosto) y mínimas en invierno (Febrero); en la parte norte del Golfo hay una variación de más de 12°C entre invierno y verano en las aguas superficiales (Zavala *et al*, 2002), mientras que en la zona sur la variación puede ser de más de 6°C (23.3°C en Febrero y 29.5 °C en Agosto).

Es bien conocido que el Golfo de México no es una cuenca de evaporación; un proceso fuerte de intercambio de calor da lugar a la formación de masas de agua profundas. Sin embargo, existe un proceso de mezcla convectiva que modifica las características de las aguas existentes, formando así un agua típica del Golfo denominada, el "Agua Común del Golfo " (GCW), con temperatura y salinidad característica de 22.5 °C y 36.4 respectivamente, la cuál se distribuye entre la superficie y los 250 m de profundidad (Elliot, 1982).

La zona sureste del Golfo está dominada por una amplia plataforma poco profunda (200 m aproximadamente) la que es conocida como el Banco de Campeche y contiene la mayor parte de las formaciones arrecifales de esta región (Alacranes, Caro Arenas y Cayo Arcas). Por otro lado, en la zona suroeste y oeste la plataforma es de menor amplitud, llegando en pocos kilómetros a profundidades de 1000 m, y esta es el área donde se localizan las formaciones arrecifales de Veracruz.

La zona norte (Veracruz y Tabasco) del sur del GdM contiene la red hidrográfica más importante de México y es donde se encuentran los ríos con alto escurrimiento, como el río Tecolutla, río Panuco ($\sim 18.9 \times 10^9 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$) río Papaloapan ($\sim 41.1 \times 10^9 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$), río Coatzacoalcos ($\sim 22.4 \times 10^9 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$) y el sistema Grijalva - Usumacinta ($\sim 105.2 \times 10^9 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$) (Carricart-Ganivet y Merino, 2001; INEGI, 2006). La influencia continental por descarga de los ríos en el Banco de Campeche es reducida, debido a que la Península de Yucatán

es de naturaleza cárstica no existen escorrentías superficiales (Merino et al., 1990; Merino 1997).

En el sur del Golfo de México, existen formaciones arrecifales clasificadas en tres regiones principales: 1) Veracruz Norte, 2) Veracruz Sur, representado por el Sistema Arrecifal Veracruzano (SAV) y 3) Banco de Campeche (Beltrán-Torres y Carricart-Ganivet, 1999). El SAV se encuentra localizado entre los $19^{\circ} 11' N$ y $96^{\circ} 08' W$ y abarca aproximadamente 22 Km. de línea de costa frente al Puerto de Veracruz (Fig. 2.1).

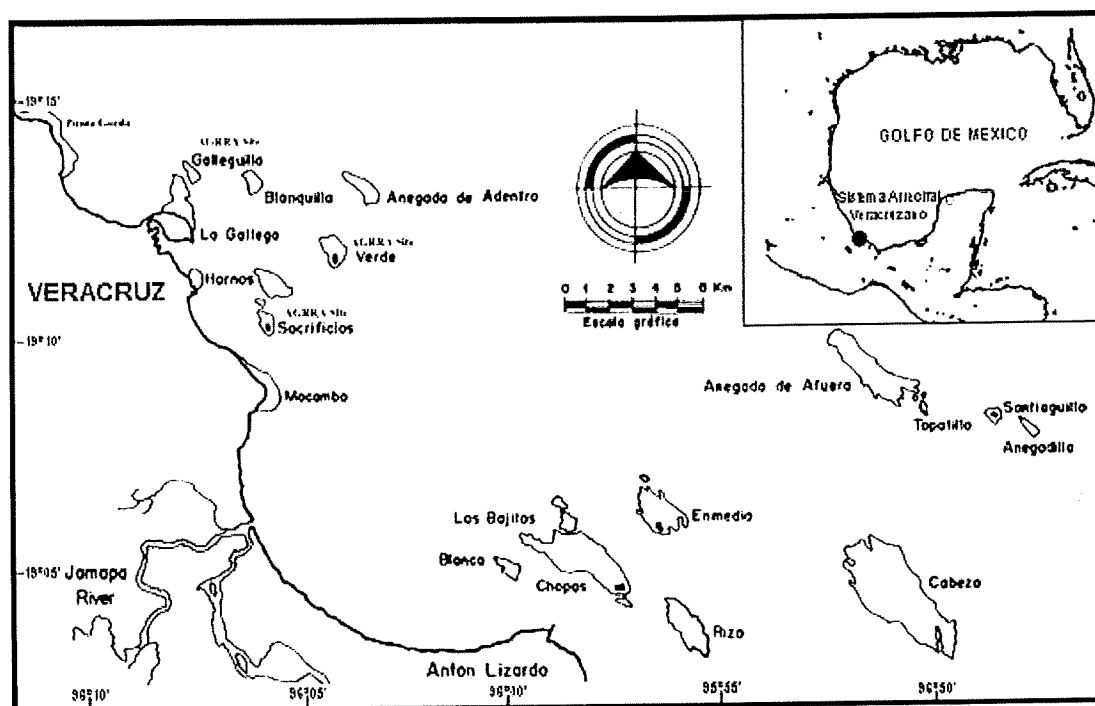


Figura 2.1 Área de estudio, mostrando el Sistema Arrecifal Veracruzano, zona de colecta del núcleo de *Montastraea faveolata*, utilizado en este trabajo (Modificada de HORTA-PUGA, 2000).

Los arrecifes del SAV se desarrollaron sobre la plataforma continental después del último período glacial, hace unos 9.000 a 10.000 años (Morelock y

Koenig, 1967; Kühlmann, 1975). Como consecuencia de la descarga de los ríos, particularmente del río Jamapa que desemboca en el centro del SAV, los corales de esta área han crecido en un ambiente naturalmente turbio, cuya visibilidad puede ser <1 m durante la estación lluviosa (junio-septiembre), cuando los ríos transportan concentraciones altas de partículas suspendidas. Por otro lado, esta zona es afectada también por frentes fríos de manera frecuente durante el invierno, los que producen una reducción en la temperatura superficial del mar (TSM) y un incremento marcado en el oleaje y la turbidez (Horta-Puga, 2000).

2.2.2 Colecta y tratamiento de limpieza del núcleo de coral.

Durante julio del 2003, se obtuvo un núcleo coral de 70 mm de diámetro y 2003 mm de longitud de una colonia de *Montastraea faveolata*, localizada a 7 m de profundidad en la Isla Anegada de Adentro en la zona norte del SAV. El núcleo se extrajo empleando un taladro hidráulico submarino con capacidad de obtener núcleos mayores a 2 m. En el laboratorio, el esqueleto de coral fue blanqueado empleando una solución de NaOCl al 5% para eliminar cualquier remanente de tejido de coral, hongos o algas endolíticas. El núcleo de coral fue seccionado en láminas de ~9 mm de espesor, mediante una sierra de doble hoja, siguiendo el eje de máximo crecimiento. Posteriormente las láminas fueron lavadas con agua corriente, con agua destilada usando una sonda ultrasónica y secadas en un horno a 60 ° C por 12 horas. Las láminas limpias fueron radiografiadas para revelar el patrón de bandas de densidad de crecimiento esquelético. Las radiografías fueron escaneadas y analizadas con la ayuda del programa CoralXDS (Coral X-Radiograph Densitometry System del National Coral Reef Institute y Nova Southeastern University Oceanographic Center, Helmle *et al.*, 2002), para determinar la tasa de crecimiento y el modelo de edad, cuyos resultados fueron contrastados contra el modelo obtenido del conteo manual de las bandas. De acuerdo al análisis de las radiografías, se calculó una tasa de

crecimiento promedio de $11.04 \text{ mm año}^{-1}$ y un registro total de 160 años para este coral.

2.2.3 Análisis Geoquímico

Para la obtención de las muestras de polvo aragonítico de las lajas de coral se utilizó un taladro de baja velocidad y una fresa de carburo de 1.5 mm de diámetro. El transecto de muestreo fue trazado a lo largo del eje de máximo crecimiento, colectando una muestra cada milímetro. Debido a la tasa de crecimiento promedio de este coral, este muestreo generó una resolución aproximadamente mensual. El polvo de cada muestra fue transferido y mantenido en viales de polipropileno de 2 ml, hasta su análisis de la composición elemental (razones elementales de Sr/Ca y Mg/Ca).

El material necesario para la preparación y manejo de las muestras fue sometido a un proceso de ultralimpieza. El material plástico usado en el análisis fue lavado en secuencia, iniciando con una solución de detergente Micro al 2% en agua desionizada por tres días. Posteriormente, el material se descontaminó en una solución de ácido clorhídrico al 10% por 1 día, con el fin de eliminar cualquier elemento traza que pueda contaminar la muestra y finalmente el material se enjuagó con abundantemente agua desionizada hasta eliminar cualquier residuo de ácido y fue secado en una estufa a 60°C por 1 hora.

Previo a la disolución, el polvo coralino se sometió a un proceso de limpieza para eliminar cualquier material no incluido en la matriz cristalina de la aragonita coralina, siguiendo el procedimiento diseñado para el análisis de elementos menores en corales (Mitsugushi *et al.*, 2001). El método consistió en una secuencia de limpieza en tres etapas: Cada muestra de polvo de coral fue tratado con 1 mL de agua desionizada (purificada en resina Chelex 100), en un baño de ultrasonido por 15 min a temperatura ambiente. El segundo paso consistió en adicionar 250 μL de peróxido de oxígeno al 30% a cada muestra y

posteriormente se sometió a ultrasonido a 60°C durante 15 min; en este paso las muestras se montaron en gradillas especiales de acrílico con un sistema de prensado para evitar que la presión generada dentro de los viales se destaparan y el material se perdiera. Durante el tercer paso, las muestras fueron tratadas con 1 mL de ácido nítrico diluido (4 mM), en ultrasonido por 15 minutos a temperatura ambiente.

Posterior a cada paso de limpieza las muestras fueron homogenizadas en un mezclador vortex, centrifugadas a 14500 rpm por 4 min y el sobrenadante eliminado por sifoneo usando una bomba peristáltica y tubería de teflón. Finalmente, las muestras tratadas se llevaron a sequedad en una campana de flujo laminar durante 24 horas. Para la disolución, se pesó 1 mg de polvo de coral en tubos de polipropileno de 5 ml previamente descontaminados. El polvo de coral fue disuelto agregando 5 mL de ácido nítrico ultrapuro al 2% y este paso se realizó como mínimo 24 horas previas al análisis instrumental, para asegurar que la disolución fuera completa.

2.2.4 Cuantificación de las razones geoquímicas de Sr/Ca y Mg/Ca mediante ICP-AES

La cuantificación de la concentración de Mg, Ca y Sr en las muestras se realizó empleando un espectrofotómetro de emisión atómica con plasma de acoplamiento inducido (ICP-AES), marca Termo Jarrel Ash, modelo Iris AP, con un dispositivo de inyección de carga (DIC) como detector. El equipo se calibró mediante 5 soluciones estándar preparadas a partir de estándares sintéticos acuosos (SPEX), donde la razón Sr/Ca y Mg/Ca son conocidas y similares a las esperadas en las soluciones de coral. La calibración y medición de las muestras se realizó usando un método modificado del utilizado por Villaescusa (2004), midiendo un estándar sintético (S3) cada 5 muestras, utilizado para corrección por deriva y exactitud. Las corridas analíticas fueron aproximadamente de 6.5 horas, lo que equivale a la mitad de la capacidad del automuestreador, para

reducir la deriva instrumental y mejorar la precisión. Como control adicional, al inicio de cada fila de muestras se colocó un estándar de coral preparado en el laboratorio, tratado y diluido de la misma manera que las muestras. La precisión del método estimada con el estándar coralino fue 0.25%, equivalente a ± 0.023 mmol/mol (1σ , $n = 149$). Con el fin de mantener la estabilidad óptica del sistema, la temperatura del laboratorio se mantuvo aproximadamente constante entre 18 – 22 °C.

2.2.5 *Análisis de datos*

La cronología de los registros geoquímicos de Sr/Ca y Mg/Ca fue ajustada con el ciclo estacional de la TSM para la región del SAV obtenida de la base de datos de ERSSTv2 (Smith y Reynold, 2004). Los datos generados fueron remuestreados a una resolución mensual, empleando el programa Analyseries (Paillard et al., 1996). En contraste con la señal de Sr/Ca, la serie de tiempo de Mg/Ca en este coral mostró pérdidas de los ciclos estacionales en algunas secciones del registro, por lo que se decidió utilizar únicamente la serie de Sr/Ca para el análisis climático.

Para comparar la reconstrucción climática generada del registro geoquímico de Sr/Ca del coral, se obtuvieron series de tiempo de temperatura superficial del mar (TSM), el índice de la Oscilación del Atlántico Norte (NAO), el patrón Pacífico/Norte América (PNA), la oscilación decadal del Pacífico (PDO) y las anomalías de temperatura de la región Niño 3.4. La serie de tiempo de temperatura superficial del mar (TSM) para la región de SAV fue obtenida de la Extended Reconstructed Sea Surface Temperatures, version 2 (ERSST.v2), registro que se extiende desde 1854 a la fecha, con una resolución espacial de $2^\circ \times 2^\circ$ (Smith y Reynolds, 2004). Los datos del índice NAO corresponden a valores mensuales, basados sobre la diferencia de presión normalizada entre Ponta Delgada, Azores y Stykkisholmur/Reykjavik (Islandia), desde 1865 a la fecha (Hurrell et al., 2003). Los datos del patrón PNA corresponden a anomalías

estandarizadas de altura geopotencial a 500 mb entre los 20° y 90°N, están disponibles a partir de 1950 en el National Center for Environmental Prediction de NOAA/ National Weather Service (Wallace y Gutzler, 1981). La oscilación decadal del Pacífico (PDO) corresponde a anomalías de TSM en medias latitudes de la cuenca del Pacífico Norte (Mantua *et al.*, 1997). El índice de El Niño 3.4 corresponde a anomalías de TSM entre las regiones Niño 3 y Niño 4, que corresponden al Pacífico ecuatorial (Trenberth, 1997).

2.3 Resultados y Discusión

El registro completo de Sr/Ca obtenido del coral *Montastraea faveolata* colectado en el SAV, así como la serie de tiempo de la TSM de la base de datos instrumental interpolada de ERSSTv2 para la misma región, se muestra en la Fig 2.2. La señal de Sr/Ca coralino mostró ciclos estacionales bien definidos y una correlación altamente significativa ($r = -0.707$, $\alpha < 0.01$) con la serie de tiempo de la TSM instrumental. Cabe resaltar la eficacia del paleotermómetro de Sr/Ca de nuestro registro, a pesar de la características dinámicas y de alta turbidez características del SAV que contrasta con la mayoría de las colonias empleadas en reconstrucciones paleoclimáticas publicadas, donde las condiciones ambientales son típicas de zonas arrecifales de baja turbidez y mas estables (Gagan *et al.*, 2000; Cole, 2003).

Independientemente de la alta correlación obtenida entre las dos señales climáticas, lo que demuestra la confiabilidad del paleotermómetro coralino de Sr/Ca para la región, ambos registros muestran algunas diferencias en frecuencias menores a la estacional (Fig. 2.2). Estas diferencias pueden ser una consecuencia de distintas escalas espaciales que ambos registros representan; los datos de TSM de ERSST.v2 son derivados de la interpolación de datos puntuales de TSM de una amplia zona (2° lat. X 2° long.) y al parecer refleja las variaciones de baja frecuencia de manera mas suavizada (Fig. 2.2b). En contraste, la señal de Sr/Ca coralina además de representar las condiciones

regionales, también muestra la variabilidad local y responde claramente a las variabilidad climática de baja frecuencia (Fig. 2.2a).

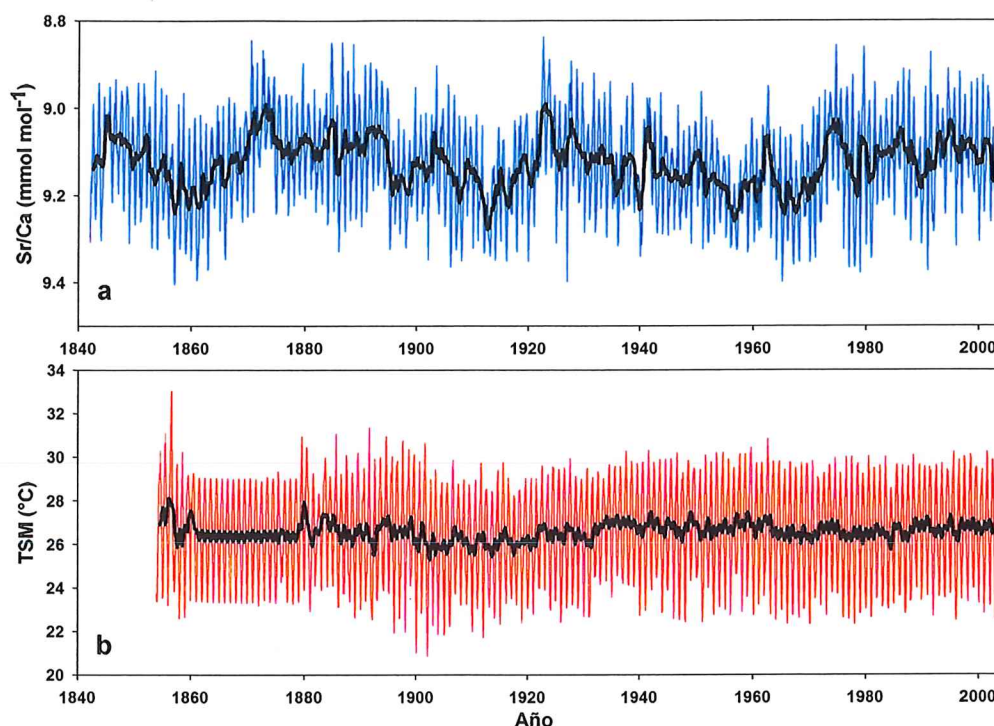


Figura 2.2. Registro de la razón molar Sr/Ca (mmol mol^{-1}) de *Montastraea faveolata* del SAV (a) y registro de temperatura superficial del mar (b) obtenido de la base de datos ERSST.v2 (Smith y Reynolds, 1994), con media móvil de 13 meses para cada uno.

Con el propósito de extraer las frecuencias significantes, y conocer los modos dominantes de variabilidad climática reconstruida del registro de Sr/Ca del coral del SAV, se realizó un análisis espectral Multi Taper MTM (Mann y Lees, 1996). Los resultados del análisis MTM (Fig. 2.3), muestra que la variabilidad de baja frecuencia esta dominada por señales significantes en una escala interanual, de ~ 2 a 6 años (f entre $0.45 - 0.14$ ciclos año^{-1}), característica de los eventos ENSO, así como por frecuencias en escalas

decadal - interdecadal (de 10 a 20 años, $f < 0.1$ ciclos año⁻¹), propios de forzamientos de baja frecuencia como el Patrón del Pacífico/Norteamericano (PNA), de la Oscilación del Atlántico Norte (NAO) y la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO). Además, la variabilidad del Sr/Ca en el coral muestra un componente de variabilidad en escalas multidecadales (30 a 90 años), que a sido descrito como parte de la variabilidad de baja frecuencia asociada con la PDO (Minobe, 1999).

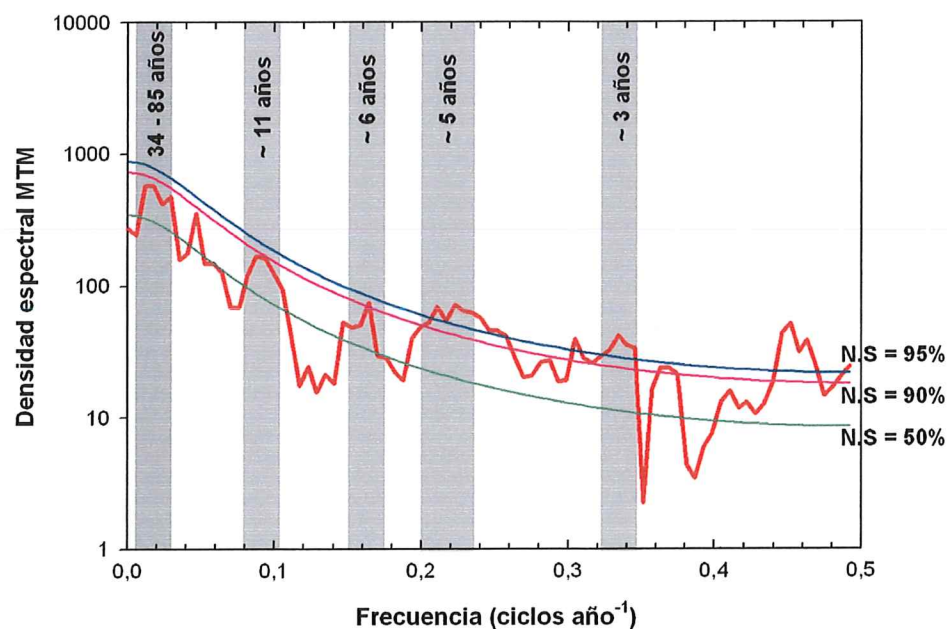


Figura 2.3. Análisis espectral Multi Taper (MTM) (Mann y Lees, 1996) de las anomalías desestacionalizadas de la razón molar Sr/Ca de *Montastraea faveolata* del SAV para el periodo de 1842 - 2002. N.S. corresponde a los niveles de significancia de 50, 90 y 95%.

2.3.1 Variabilidad Interanual de Sr/Ca

Debido a que existen en el coral frecuencias que se relacionan con ENSO, con la finalidad de entender si esta relación es causal, se analizó la

serie de Sr/Ca en el coral del SAV usando un filtro pasa banda que aisló las frecuencias que corresponden al periodo entre 2 a 7 años y se comparó con las anomalías de TSM de la región El Niño 3.4 filtradas de la misma manera (Fig. 2.4a). Como se mencionó previamente, la señal interanual del Sr/Ca muestra claramente un componente interanual, típico de la variabilidad de ENSO. Sin embargo, la correlación entre ambas señales muestra que existen periodos donde ambos registros climáticos se encuentran en fase y otros periodos ocurre un desfase entre ambos (Fig. 2.4b).

Es bien conocido que los eventos ENSO constituyen los fenómenos de interacción océano – atmósfera que dominan la variabilidad interanual en el sistema climático global (Philander, 1990). Aunque el fenómeno ENSO tiene su origen, y su expresión mas intensa en el Pacífico Tropical, sus efectos se observan en diferentes regiones del planeta (Saravanan y Chang, 2000). La influencia remota del ENSO ocurre a través de un mecanismo de teleconexiones atmosféricas, entre las más conocidas se encuentra el Patrón PNA, la cuál asocia ENSO con la variabilidad en el Pacífico Norte y amplias regiones de Norte América (Wallace y Gutzler, 1981).

Los antecedentes relacionados al efecto directo de los eventos ENSO sobre la TSM del sur del GdM son extremadamente escasos. Algunos estudios han mostrado la influencia de ENSO sobre la precipitación en México, particularmente sobre el sur de México, donde han encontrado que la variabilidad estacional total en lluvias puede ser explicada hasta un 40% por la relación con el fenómeno ENSO (Magaña *et al.*, 1999). Durante los inviernos “El Niño” se aumenta la actividad de los “Nortes” y se producen anomalías negativas en precipitación, mientras que durante el verano hay una disminución de los ciclones tropicales. Por otra parte, durante veranos “La Niña”, las condiciones de precipitación vuelven a la normalidad o incluso por encima de la media climatológica. (Magaña *et al.*, 2003). Las investigaciones que de alguna manera incluyen la respuesta oceánica del GdM a los forzamientos de ENSO se

limitan a estudios sinópticos de correlaciones espaciales que abarcan áreas muy grandes del océano. Estos estudios muestran que la parte norte del GdM responde negativamente a las anomalías de la TSM del Pacífico oriental tropical, mientras que la parte sur, donde se localiza el SAV la respuesta es neutra o ligeramente positiva (Mestas-Núñez y Miller, 2006).

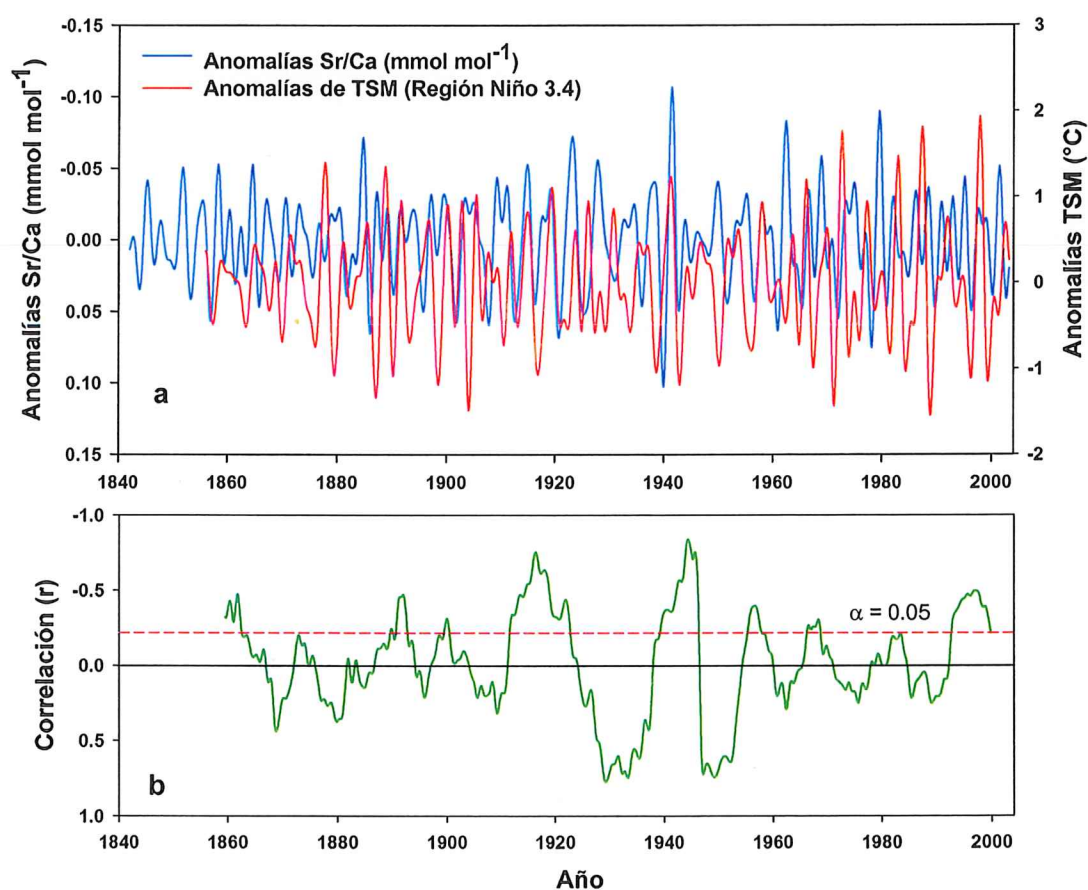


Figura 2.4. Comparación entre las frecuencias interanuales (Filtro de pasabanda de 2 a 7 años) de las anomalías desestacionalizadas de Sr/Ca del SAV y de las anomalías TSM de la Región de El Niño 3.4 (a). Correlación móvil de 7 años entre los dos registros (b).

Debido a que el SAV se localiza en la parte centro sur del GdM, la influencia (señal) interanual del ENSO sobre los la TSM obtenida de los corales de esta región, pudiera registrarse de dos maneras. Por un lado, el patrón de teleconexión extratropical entre el Pacífico y Norte América (patrón PNA) es influenciado directamente por la variabilidad de ENSO (Horel y Wallace, 1981; Renwick y Wallace, 1996). Se ha propuesto que, debido al patrón de teleconexiones, el tiempo de retardo en la respuesta de la TSM al forzamiento de El Niño puede variar en un intervalo de 3 a 6 meses para diferentes océanos del planeta, pero la correlación mas alta entre el máximo de la anomalía de la TSM en la región del Niño con el Atlántico Nortropical presenta un retardo hasta de 6 meses (Klein et al., 1999). Es posible que la baja correlación entre la variabilidad interanual del Sr/Ca en el coral del SAV y las anomalías térmicas de la señal del Niño3.4, que se presenta en algunas secciones del registro sea consecuencia de este desfase en la respuesta. Por otro lado, la correlación móvil entre ambas señales evidencia una respuesta directa y no desfasada de la TSM al forzamiento del ENSO en periodos de alta correlación ($r > 0.5$), lo que sugiere que el sur del Golfo de México puede responder directamente al forzamiento del ENSO, más que de a una respuesta remota a través del PNA (Ropelewski y Halpert, 1986).

2.3.2 Variabilidad Interdecadal de Sr/Ca

La variabilidad climática en escalas decadal – interdecadal del SAV fue analizada comparando el registro de baja frecuencia de la razón Sr/Ca con tres de los principales forzamientos atmosféricos de gran escala temporal y espacial: la Oscilación Decadal del Pacífico – PDO (Mantua *et al.*, 1997), el patrón Pacífico/Norte América – PNA (Wallace y Gutzler, 1981) y la oscilación del Atlántico Norte – NAO (Hurrell *et al.*, 2003). La frecuencia decadal – interdecadal del registro de Sr/Ca para época de invierno fue aislada utilizando un filtro de paso bajo con periodo mayor a 10 años ($f < 0.1$ ciclos año⁻¹) y se

comparó con las señales de invierno (diciembre a febrero) de la PDO, PNA y NAO filtradas de la misma manera (Figs. 2.5, 2.6 y 2.7 respectivamente).

La variabilidad de baja frecuencia del registro del Sr/Ca del SAV muestra una relación negativa y altamente significativa con la PDO instrumental ($r = -0.409$, $\alpha < 0.01$), lo que indica que las anomalías positivas de temperatura mantienen una relación en fase con la PDO positiva (Fig. 2.5a). Para investigar la forma que la relación se mantiene a largo plazo, se realizó una correlación móvil (ventana de 21 años), que muestra que la relación entre ambas series se positiva y significativa cuando la señal de la PDO se mantiene estable, por ejemplo los periodos de 1915 a 1925 y de 1936 a 1946 (Fig. 2.5b). En contraste, la correlación entre ambos registros se hace negativa o pierde significancia coincidente con los periodos cuando la PDO cambia de fase y en la última sección del registro de Sr/Ca donde la señal de baja frecuencia muestra ciclos decadales regulares, e independientes del forzamiento de la PDO (Fig. 2.5b).

De manera similar que con la PDO, la variabilidad de baja frecuencia de Sr/Ca para época de invierno del SAV muestra una relación negativa con el patrón climático del Pacífico/Norteamérica (PNA), donde las anomalías positivas de temperatura se corresponden con índice PNA positivo (Fig. 2.6a). La correlación total entre ambos registros mostró ser mayor y altamente significativa ($r = -0.543$, $\alpha < 0.01$), comparado con la correlación obtenida con la PDO. Independientemente de la correlación total, la correlación móvil entre ambas señales (ventana de 11 años) muestra una sincronía de fases casi perfecta ($r \sim -1.0$) durante periodos específicos; de 1960 a 1965 y 1982 a 1987, cuando la señal del PNA es positiva (Fig. 2.6b). La correlación baja, e inclusive cambia de signo y se hace altamente significativa ($r \sim 0.7$), durante los periodos correspondientes a una PNA negativa, como en 1977 (Fig. 2.6b).

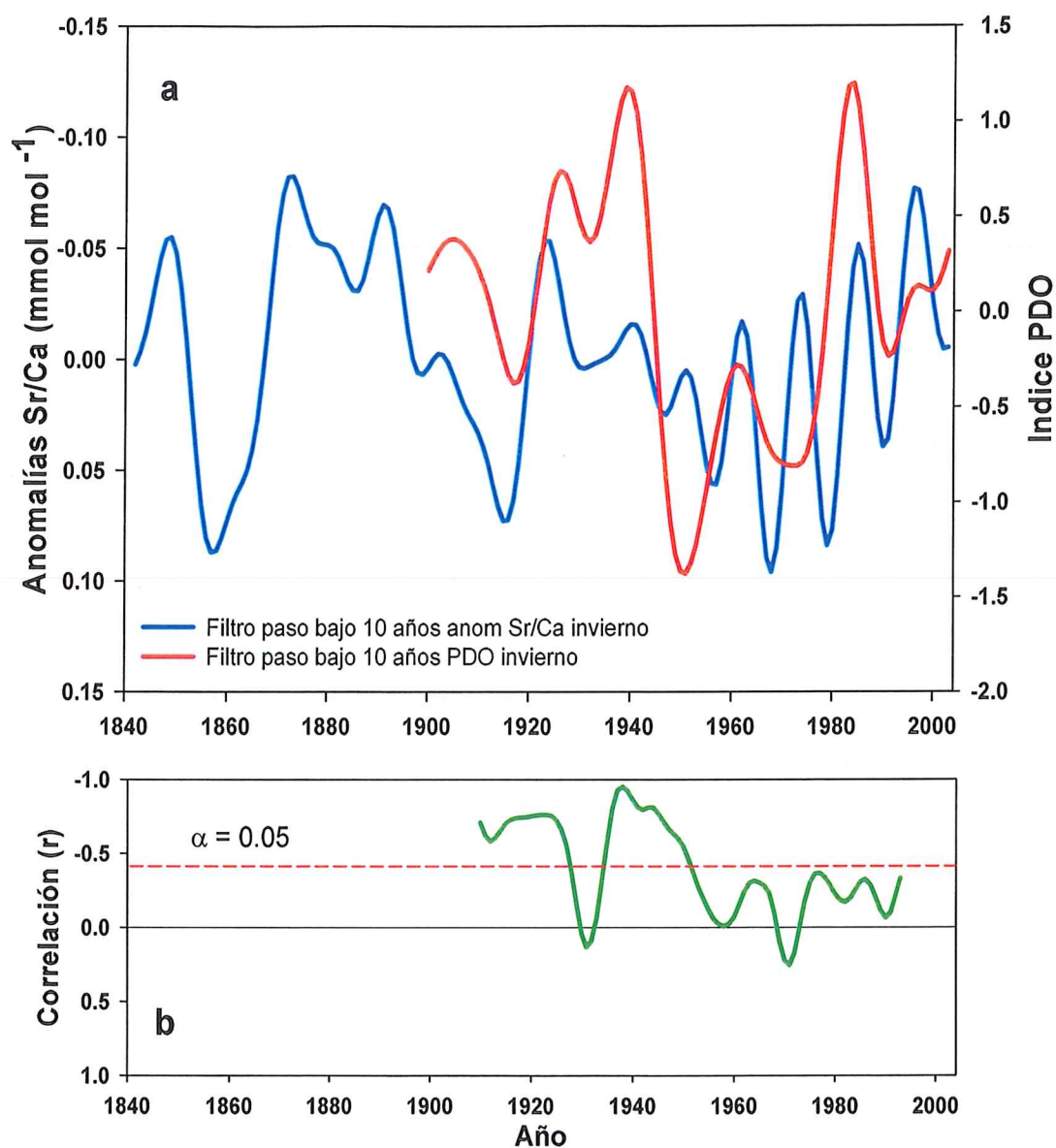


Figura 2.5. Comparación entre las frecuencias interdecadales (filtro de paso bajo, ventana de 10 años) de las anomalías desestacionalizadas de Sr/Ca del SAV para invierno y el índice PDO de invierno (a). Correlación móvil de 21 años entre los dos registros (b). Se muestra el nivel de significancia de la correlación.

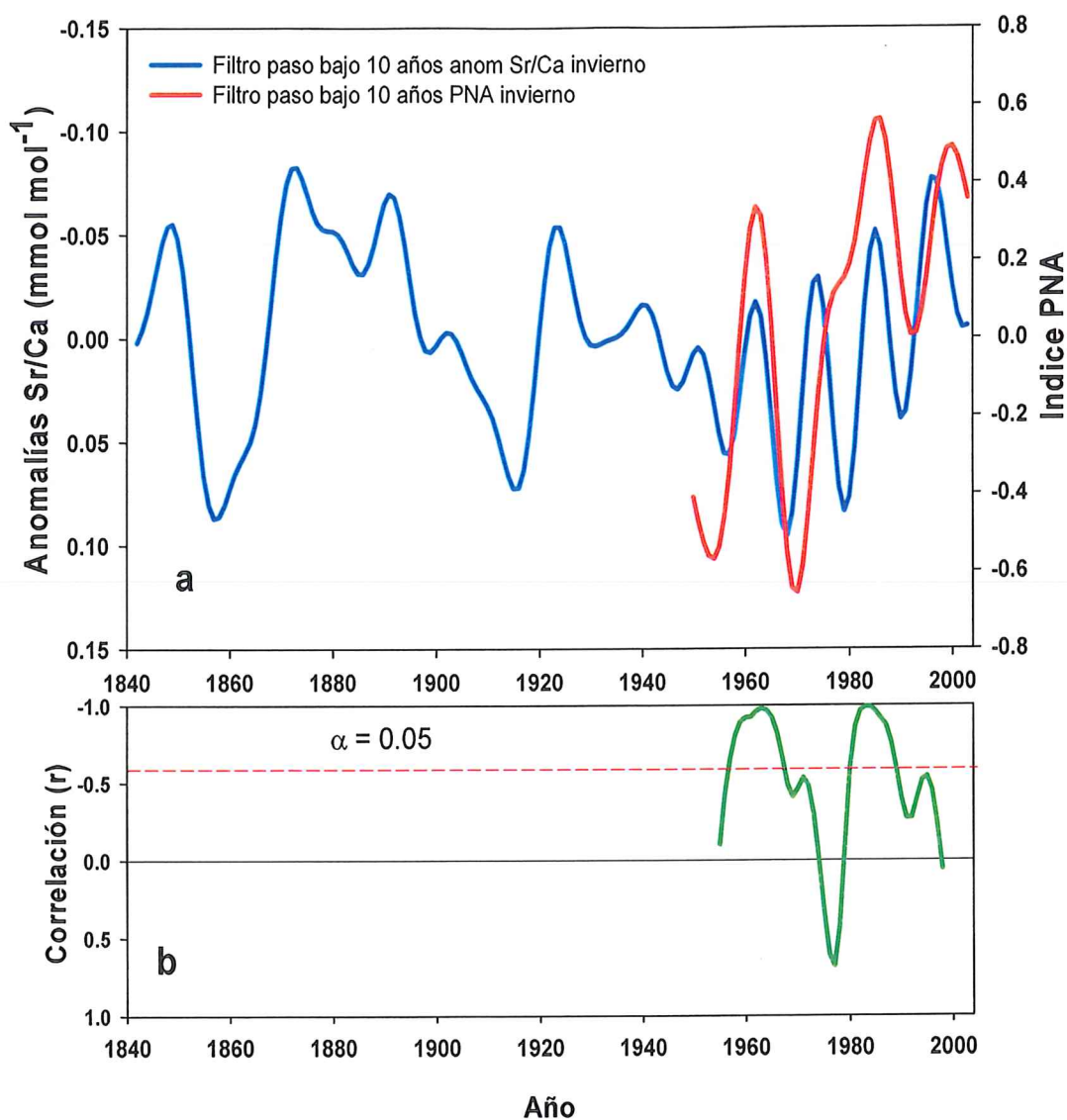


Figura 2.6. Comparación entre las frecuencias interdecadales (Filtro de paso bajo de 10 años) de las anomalías desestacionalizadas de Sr/Ca del SAV para invierno y el patrón PNA de invierno (a). Correlación móvil de 11 años entre los dos registros (b). Se muestra el nivel de significancia de la correlación.

La señal climática obtenida de la razón Sr/Ca en el coral *M. faveolata* del SAV, constituye el primer registro coralino mostrando la influencia de la PDO

sobre al Atlántico occidental y específicamente en el Golfo de México. No obstante, la relación de la PDO con el patrón PNA en zonas extratropicales ha sido ampliamente estudiada desde el punto de vista climatológico, donde el PNA constituye el puente de teleconexión hacia el Atlántico (Trenberth y Hurrell, 1994; Latif y Barnett, 1996). La correlación entre la PDO de invierno y el PNA de invierno, periodo donde la señal de ambos forzamientos es mas intensa, es altamente significativa ($r = 0.843$, $\alpha < 0.1$), lo que indica que una PDO positiva corresponde con un PNA mas positivo también. Un índice PNA positivo (y PDO también positivo) ha sido asociado con temperaturas más bajas de lo normal en el sureste de Estados Unidos y norte del Golfo de México. Esto es consecuencia del desplazamiento hacia el sur del centro de baja presión, lo que permite que masas de aire continentales polares y Árticas se penetren más frecuentemente hacia el sur (Leathers *et al.*, 1991). De hecho, estudios con registros cortos de corales del norte del Golfo de México (Flower Garden Banks), han mostrado la manifestación del PNA donde las anomalías positivas del índice, que se corresponden con temperaturas anormalmente bajas en esta región, muestran un efecto adverso (negativo) sobre el crecimiento de los corales (e.g. Dodge y Lang, 1983; Slowey y Crowley, 1995).

Este comportamiento es exactamente inverso a lo que registra el coral del SAV y esto puede estar relacionado con las diferencias entre ambas regiones del Golfo. En contraste con lo que ocurre en el norte, la TSM del sur del Golfo de México muestra una respuesta diferente en la escala decadal – interdecadal. Tal como se mostró previamente, durante los periodos donde la PDO y PNA son positivos, se encuentran en fase con periodos de anomalías positivas de temperatura de invierno (Fig. 2.5a y 2.6a). Este comportamiento es coincidente con el patrón de anomalías en la TSM que ocurren durante la fase positiva de la PDO en el Pacífico oriental a la misma latitud. Esto sugiere que el patrón de anomalías de la TSM en el Pacífico pudiera propagarse también a esta región, vía alguna conexión atmosférica por la estrecha franja de tierra que los separa. Por otro lado, existen diferencias claras en el patrón de anomalías

de TSM entre el norte y sur del Golfo de México, que puede ser una consecuencia de las diferencias en la circulación oceánica entre estas dos zonas que se encuentran dominadas por dos giros ciclónicos/anticiclónicos claramente separados; el giro ciclónico de la bahía de Campeche en la parte sur y el giro anticiclónico del Golfo oeste (Zavala *et al.*, 2002).

Estos nuevos resultados son de alguna manera coincidente con lo señalado por Mestas-Núñez y Miller (2006), quienes muestran que el Golfo de México presenta dos regiones (norte y sur) bien delimitadas en la respuesta a la variabilidad interdecadal de la PDO. De manera similar a la respuesta del GdM a la variabilidad interanual de ENSO, la respuesta de baja frecuencia del norte del GdM muestra una correlación negativa con el forzamiento positivo de la PDO, mientras que en la parte sur del GdM, presenta una respuesta en las anomalías de TSM que va de neutra a ligeramente positiva con la PDO positiva (Mestas-Núñez y Miller, 2006). Sin embargo, la amplitud en la variabilidad en escalas decadal – interdecadal del registro de Sr/Ca en el coral del SAV es mucho mas intensa de lo que muestra este estudio sinóptico y es posible que estas diferencias se deban a la baja resolución espacial de los registros instrumentales (5° lat. x 5° long.), empleada para construir el patrón espacial de correlaciones usada por estos autores.

La variabilidad de baja frecuencia del registro de Sr/Ca para época de invierno del SAV muestra también una relación negativa con la NAO (Fig. 2.7a), lo que significa que anomalías positivas de temperatura corresponden con NAO positivas. Las series muestran una correlación total relativamente modesta ($r = -0.337$, $\alpha < 0.05$); no obstante, la correlación móvil (ventana de 21 años) muestra periodos donde ambas señales se alinean en fase, con correlaciones altamente significantes ($r > -0.7$, $\alpha < 0.01$), particularmente los segmentos del registro que van de 1891 a 1894, de 1921 a 1927 y de 1975 a 1980 (Fig. 2.7b).

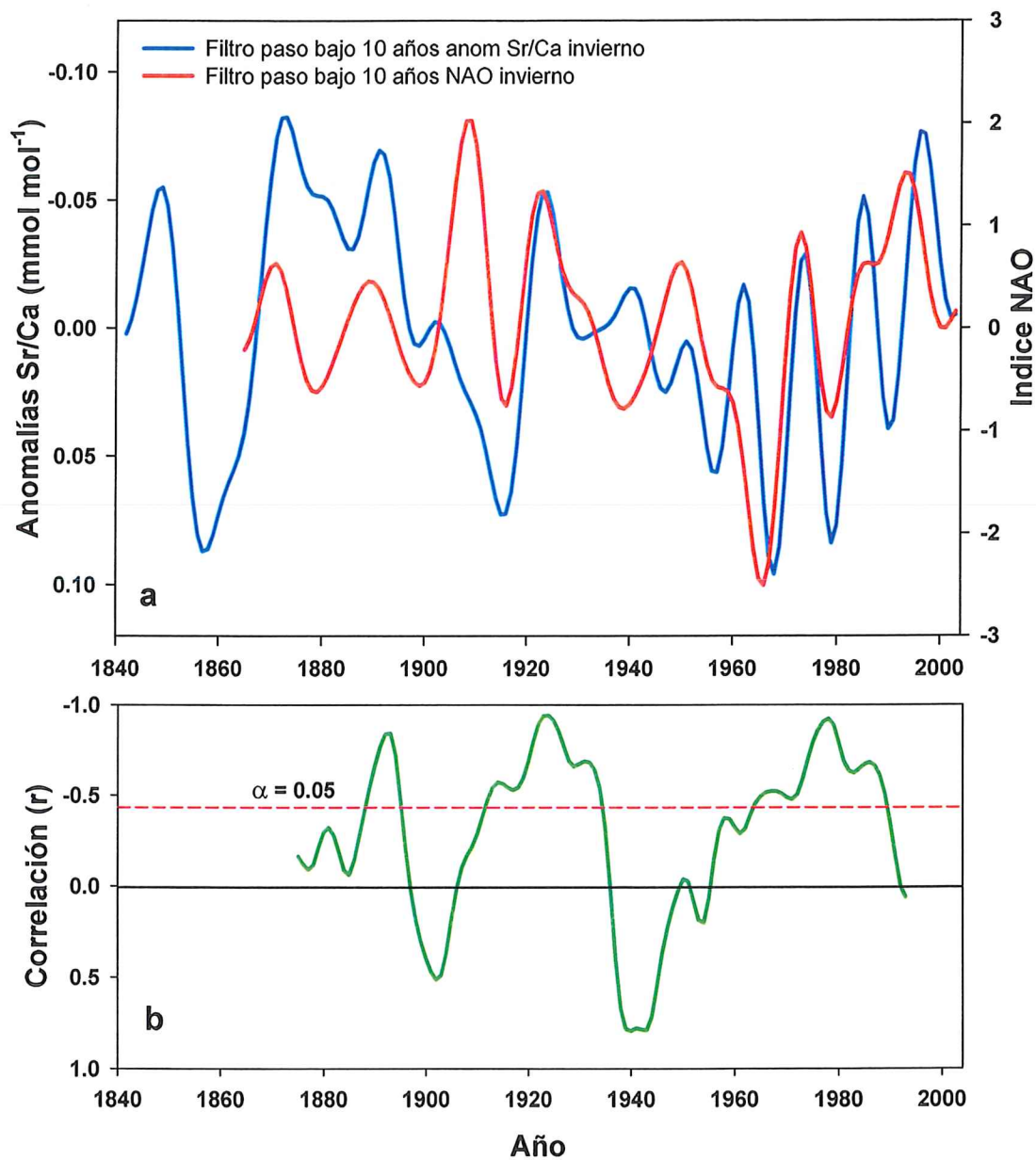


Figura 2.7. Comparación entre las frecuencias interdecadales (Filtro de paso bajo de 10 años) de las anomalías desestacionalizadas de Sr/Ca del SAV para invierno y el índice NAO de invierno (a). Correlación móvil de 21 años entre los dos registros (b).

La NAO, considerada una de las principales fuentes de variabilidad climática en el sector del Atlántico (Hurrell, 1995), produce anomalías en la TSM invernales en latitudes medias y altas del Atlántico Norte a escalas interanuales y decadales (Bjerknes, 1964; Molinari *et al.*, 1997, Visbeck *et al.* 2001). Así por ejemplo, una señal positiva de la NAO genera anomalías positivas de TSM en el Atlántico Nortropical Occidental, lo que ha sido demostrado instrumentalmente, así como con proxies coralinos en *Diploria labyrinthiformis* de Bermudas (Cohen *et al.*, 2004). El registro geoquímico de Sr/Ca del SAV muestra la misma respuesta de la TSM de invierno en el sur del Golfo de México a la variabilidad impuesta por la NAO en la zona de Bermudas y el Atlántico Nortropical Occidental, por lo que se infiere que parte de la variabilidad interdecadal en anomalías de TSM del sur del Golfo de México es explicada por las variaciones de este forzamiento atmosférico. Este resultado es relevante, ya que los estudios que muestran la respuesta al forzamiento de la NAO, a nivel del hemisferio norte y la cuenca del Atlántico (Hurrell *et al.* 2003 y referencias citadas aquí), generalmente excluyen el Golfo de México.

2.4 Conclusiones

El registro geoquímico de la razón molar de Sr/Ca de *Montastraea faveolata* del SAV es un trazador confiable de la TSM local, mostrando claramente variaciones interanuales y decadales – interdecadales en respuesta a los principales forzamientos climáticos conocidos, a pesar de la características dinámicas y de alta turbidez en la que este coral crece.

Las anomalías de la razón Sr/Ca en este coral a escala interanual parecen responder al forzamiento de ENSO, tanto de manera directa (alta correlación con ENSO), como remota vía teleconexiones extratropicales (patrón PNA).

La variabilidad decadal – interdecadal de la razón Sr/Ca en el coral del SAV es más intensa durante el periodo de invierno, responde de manera positiva a los forzamientos de amplia escala espacial y temporal como son la PDO, PNA y NAO. La TSM (registrada a través de la razón Sr/Ca) en el sur del Golfo de México responde con un incremento de las anomalías positivas de invierno cuando la PDO, PNA y NAO son positivos, lo que contrasta con la respuesta conocida de los corales de la región del norte del Golfo de México.

Este estudio, que presenta por primera vez un registro paleoclimático de alta resolución con corales para la región del sur del GM, constituye en una valiosa herramienta para entender la variabilidad climática del Golfo de México y su respuesta a los forzamientos climáticos mas relevantes a nivel global.

2.5 Referencias

- Beck, J.W., R.L. Edwards, E. Ito, F.W. Taylor, J. Recy, F. Rougerie, P. Joannot y C. Henin. 1992. Sea-surface temperature from Coral Skeletal Strontium/Calcium ratios. *Science*. 257: 644 – 647.
- Beltrán-Torres, A. y J. P. Carricart-Ganivet. 1999. Lista revisada y clave para los corales pétreos zooxantelados (Hydrozoa: Milleporina; Anthozoa: Scleractinia) del Atlántico mexicano. *Revista de Biología Tropical* 47 (4): 813-829.
- Bjerknes, J. 1964. Atlantic air-sea interaction. *Advances in Geophysics* 10: 1 – 82.
- Carricart-Ganivet, J.P. y M. Merino. 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: 133 – 146.
- Carriquiry J.D, Risk M.J. y Schwarcz H.P. 1988. Timing and temperature record from stable isotopes of the 1982-83 El Niño warming event in Eastern Pacific corals. *Palaos* 3: 359-364.
- Carriquiry, J.D., M.J. Risk y H. Schwarcz. 1994. Stable isotope geochemistry of corals from Costa Rica as proxy indicator of the El Niño/Southern Oscillation (ENSO). *Geochimica et Cosmochimica Acta* 58: 335 – 351.

- Chang P., T. Yamagata, P. Schopf, S.K. Behera, J. Carton, W.S. Kessler, G. Meyers, T. Qu, F. Schott, S. Shetye y S.-P. Xie. 2006. Climate fluctuations of tropical coupled systems – The role of ocean dynamics. *Journal of Climate* 19: 5122 - 5174.
- Cochrane, J.D. 1972. Separation of the anticyclone and subsequent developments in the loop current. En: Contributions of the Physical Oceanography of the Gulf of Mexico. Vol. II, L.R.A. Capurro and J.L. Reid. eds., Gulf Publishing Co. Pag 91-106.
- Cohen, A.L., S.R. Smith, M.S. McCartney y J. van Etten. 2004. How brain corals record climate: an integration of skeletal structure, growth and chemistry of *Diploria labyrinthiformis* from Bermuda. *Marine Ecology Progress Series*. 271: 147 – 158.
- Cole J.E. 2003. Holocene coral records: windows on tropical climate variability. En: Mackay A, Battarbee R, Birks J. y Oldfield F. (Eds.). *Global Change in the Holocene*. Arnold Pub. London, U.K. pp.168-192.
- Crowley T.J., T. Quinn y W.T. Hyde. 1999. Validation of coral temperature calibrations. *Paleoceanography* 14: 605 - 615.
- de Villiers S., G.T. Shen y B.K. Nelson. 1994. The Sr/Ca-temperature relationship in coralline aragonite: influence of variability in (Sr/Ca) seawater and skeletal growth parameters. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 58: 197 - 208.
- Dodge, R.E. y J.C. Lang. 1983. Environmental correlates of hermatypic coral (*Montastrea annularis*) growth on the East Flower Gardens Bank, northwest Gulf of Mexico. *Limnology and Oceanography* 28(2): 228 – 240.
- Elliot, B.A. 1982. Anticyclonic rings in the Gulf of Mexico. *Journal of Physical Oceanography* 12: 1292 - 1309.
- Fedorov, A.V y S.G. Philander. 2000. Is El Niño changing? *Science* 288: 1997 – 2002.
- Gagan, M.K., L.K. Ayliffe, J.W. Beck, J.E. Cole, E.R.M. Druffel, R.B. Dunbar y D.P. Schrag. 2000. New views of tropical paleoclimates from corals. *Quaternary Science Reviews* 19: 45-64

- Helmle, K.P., K.E. Kohler y R.E. Dodge. 2002. Relative Optical Densitometry and The Coral X-radiograph Densitometry System: CoralXDS. *Int. Soc. Reef Studies 2002 European Meeting*. Cambridge, England. Sept. 4-7. Poster.
- Horel, J.D. y J.M. Wallace. 1981. Planetary-scale atmospheric phenomena associated with the Southern Oscillation. *Monthly Weather Review* 109: 813 – 829.
- Horta-Puga, G. 2000. Condition of selected reef sites in the Veracruz Reef System (stony corals and algae). En: Status of Coral Reefs in the western Atlantic: Results of initial Surveys, Atlantic and Gulf Rapid Reef Assessment (AGRRA) Program. J.C. Lang (ed.). *Atoll Research Bulletin* 496. Pag. 360 - 369.
- Hurrell, J.W. 1995. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: regional temperatures and precipitation. *Science* 269: 676 – 679.
- Hurrell, J. W., Y. Kushnir, G. Ottersen y M. Visbeck. 2003. An Overview of the North Atlantic Oscillation. En: The North Atlantic Oscillation: Climatic Significance and Environmental Impact. *Geophysical Monograph* 134. American Geophysical Union.
- INEGI. 2006. Cuencas Hidrológicas. Mayo 1 de 2006. http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/datosgeogra/basicos/hidrologia/rios/cuencas_hidrologicas.cfm?c=520.
- Klein, S.A., B.J. Soden y N.C. Lau. 1999. Remote sea surface temperature variations during ENSO: Evidence for a tropical atmospheric bridge. *Journal of Climate* 12: 917 – 932.
- Kühlmann, D.H.H. 1975. Charakterisierung der korallenriffe vor Veracruz/Mexiko. *Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie* 60: 495 - 521.
- Latif, M. y T.P. Barnett. 1996. Decadal climate variability over the North Pacific and North America: Dynamics and predictability. *Journal of Climate* 9: 2407 - 2423
- Leathers, D.J., B. Yarnal y M.A. Palecki. 1991. The Pacific/North American teleconnection pattern and United States climate. Part I: regional temperature and precipitation associations. *Journal of Climate* 4: 517 – 528.
- Linsley B.K., G.M. Wellington y D.P. Schrag. 2000. Decadal sea surface temperature variability in the subtropical South Pacific from 1726 to 1997 A.D. *Science* 290:1145 - 1108.

- Linsley B.K., G.M. Wellington, D.P. Schrag, L. Ren, M.J. Salinger y A.W. Tudhope. 2004. Geochemical evidence from corals for changes in the amplitude and spatial pattern of South Pacific interdecadal climate variability over the last 300 years. *Climate Dynamics* 22: 1 - 11.
- Magaña, V.O., J.A. Amador y S. Medina. 1999. The mid-summer drought over Mexico and Central America. *Journal of climate*, 12: 1577 – 1588.
- Magaña, V.O., J.L. Vázquez, J.L. Pérez y J.B. Pérez. 2003. Impact of El Niño on precipitation in Mexico. *Geofísica Internacional*, 42 (3): 313 – 330.
- Mann M.E. y Lees J.M. 1996. Robust estimation of background noise and signal detection in climatic time series. *Climatic Change* 33: 409 - 445.
- Mantua N.J., S.R. Hare, Y. Zhang, J.M. Wallace y R.C. Francis. 1997. A Pacific decadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bulletin of the American Meteorological Society* 78: 1069 - 1079.
- Marshall, J.F. y M.T. McCulloch. 2002. An assessment of the Sr/Ca ratio in shallow water hermatypic corals as a proxy for sea surface temperature. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 66: 3263 – 3280
- Merino, M. 1997. Upwelling on the Yucatán Shelf: Hydrographic evidence. *Journal of Marine Systems* 13: 101 – 121.
- Merino, M., S. Czitrom, E. Jordán, E. Martín, P. Thomé y O. Moreno. 1990. Hydrology and rain flushing of the Nichupte Lagoon System, Cancun, Mexico. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 30: 223 - 237.
- Mestas-Núñez, A.M. y A.J. Miller. 2006. Interdecadal variability and climate change in the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography* 69: 267 – 284.
- Molinari, R.L., D. Mayer, J. Festa y H. Bezdek. 1997. Multi-year variability in the near surface temperature structure of the mid-latitude western North Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research* 102: 3267 – 3278.
- Morelock, J., and K.J. Koenig. 1967. Terrigenous sedimentation in a shallow water coral reef environment. *Journal of Sedimentary Petrology* 37: 1001 - 1005.
- Nowlin, W.D. 1972. Winter circulation patterns and property distributions. En: Contributions of the Physical Oceanography of the Gulf of Mexico. Vol. II, L.R.A. Capurro and J.L. Reid. eds., Gulf Publishing Co. Pag. 3 - 51.

- Paillard D., L. Labeyrie y P. Yiou. 1996. Macintosh program performs time-series analysis. *Eos Transactions AGU* 77,379.
- Philander, S. G. 1990. El Niño, La Niña, and the Southern Oscillation. *Academic Press*. 293 pp.
- Philander, S.G. y A.V. Fedorov. 2003. Is El Niño sporadic or cyclic? *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 31: 579 – 594.
- Renwick, J.A. y J.M. Wallace. 1996. Relationships between North Pacific wintertime blocking, El Niño, and the PNA pattern. *Monthly Weather Review* 124: 2071 – 2076.
- Ropelewski, C.F. y M.S. Halpert. 1986. North American precipitation and temperature patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation (ENSO). *Monthly Weather Review* 114: 2352 - 2362
- Saravanan, R. y P. Chang. 2000. Interaction between Tropical variability and El Niño-Southern oscillation. *Journal of Climate* 13 (13): 2177 - 2194
- Shen C.C., T. Lee, C.Y. Chen, C.H. Wang, C.F. Dai y L.A. Li 1996. The calibration of D[Sr/Ca] versus sea surface temperature relationship for *Porites* corals. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 60: 3849 - 3858.
- Slowey, N.C y T. J. Crowley. 1995. Interdecadal variability of Northern Hemisphere circulation recorded by Gulf of Mexico corals. *Geophysical Research Letters* 22 (17): 2345 – 2348.
- Smith S.V., R.W. Buddemeier, R.C. Redalje y J.E. Houck. 1979. Strontium-calcium thermometry in coral skeletons. *Science* 204: 404 - 407.
- Smith, T. M. y R. W. Reynolds. 2004. Improved extended reconstruction of SST (1854–1997). *Journal of Climate* 17: 2466 – 2477.
- Trenberth K.E. 1997. The definition of El Niño. *Bulletin of the American Meteorological Society* 78: 2771 - 2777.
- Trenberth K.E y J.W. Hurrell. 1994. Decadal atmosphere-ocean variations in the Pacific. *Climate Dynamics* 9: 303 - 319.

- Vásquez De la Cerda, A.M. 1993. Oceanografía física del Oeste del Golfo de México. Tomo I. Secretaria de Marina Armada de México. Heroica Escuela Naval Militar. 314 p.
- Villaescusa, J.A. 2004. Reconstrucción de la variabilidad climática reciente en el Pacífico Nororiental Tropical mediante trazadores geoquímicos en corales. Tesis de Doctorado. Instituto de Investigaciones Oceanológicas - Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California. 172 p.
- Visbeck, M.H, J.W. Hurrell, L. Polvani y H.M. Cullen. 2001. The North Atlantic Oscillation: past, present and future. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 98 (23): 12876 – 12877.
- Wallace, J.M. y D. S. Gutzler. 1981. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter. *Monthly Weather Review* 109: 784 - 812.
- Zavala-Hidalgo, J., A. Pares-Sierra y J. Ochoa. 2002. Seasonal variability of the temperature and heat fluxes in the Gulf of Mexico. *Atmosfera* 15: 81 – 104.

CAPITULO 3

PARAMETROS DE CRECIMIENTO DE *Montastraea faveolata* COMO TRAZADORES DE CONDICIONES AMBIENTALES EN EL SUR DEL GOLFO DE MEXICO

Resumen

El estudio de las bandas de densidad presentes en los esqueletos de coral provee valiosa información sobre condiciones ambientales en la que los corales crecen. Los parámetros de crecimiento (tasa de crecimiento, densidad y tasa de calcificación) han mostrado estar correlacionados con la temperatura superficial del mar a diferentes escalas espaciales y temporales. La tasa de crecimiento esquelético (mm año^{-1}) del coral *Montastraea faveolata* del Sistema Arrecifal Veracruzano (SAV), se incrementó durante la fase positiva (en invierno) de los forzamientos atmosféricos que operan en el sur del Golfo de México, como el Patrón Pacífico/Norte América (PNA), la Oscilación del Atlántico Norte (NAO) y la Oscilación Decadal del Pacífico. Esto significa que el crecimiento anual responde a la extrema variabilidad de largo plazo de la TSM de la región (en escalas decadal - multidecadal). La cercana relación entre la tasa de crecimiento con la variabilidad del PNA, NAO y PDO, sugiere que los corales responden no solo a cambios en la TSM sino a las amplias condiciones climáticas resultantes de los cambios en circulación atmosférica que afectan el sur del Golfo de México. Estos resultados indican también que es posible reconstruir la variabilidad histórica del PNA, NAO y PDO en escalas de tiempo que exceden las de los registros instrumentales.

3.1 Introducción

Durante su crecimiento, los corales hermatípicos producen bandas de densidad anual en sus esqueletos (bandas de alta y baja densidad) como resultado de cambios en la tasa de crecimiento y calcificación (Knutson *et al.*, 1972). El estudio de estas bandas provee valiosa información sobre condiciones ambientales pasadas (Barnes y Lough, 1996) y se ha constituido en una de las líneas de investigación paleoceanográfica de mayor desarrollo (Druffel, 1997; Gagan *et al.*, 2000,). La mayoría de los estudios sobre crecimiento de corales se han realizado en el Pacífico tropical usando principalmente corales del género *Porites* (Barnes y Lough, 1989 y 1993; Lough y Barnes, 1990, 1997 y 2000), mientras que en el Atlántico los esfuerzos se han enfocado en *Montastraea annularis* (Graus y Macintyre, 1982; Dodge y Lang, 1983; Dodge y Bass, 1984; Carricart-Ganivet, 2004).

Los parámetros de crecimiento (tasa de crecimiento, densidad y tasa de calcificación), han mostrado estar correlacionados con variables ambientales estacionales, tales como la luz y la temperatura superficial del mar (TSM) (Buddemeier *et al.*, 1974; Buddemeier y Kinzie, 1976; Lough y Barnes, 1990). Por lo tanto, el estudio de estos parámetros permite entender la variabilidad de la TSM a diferentes escalas tanto espaciales como temporales y su relación con forzamientos atmosféricos tanto tropicales como extratropicales (Slowey y Crowley, 1995; Cohen *et al.*, 2004).

Además de ser empleada como trazador de las condiciones ambientales, la tasa de crecimiento esquelético es una variable clave en el estudio de la biología de corales, ya que indica el estado físico de los corales y su éxito ecológico. El crecimiento esquelético determina la capacidad de una colonia para competir por espacio y luz, así como su habilidad para reparar daños estructurales causados por actividad antropogénica, tormentas o predadores, ya que la esquelétogénesis es controlada por la calcificación (Langdon y Atkinson, 2005). Por tanto, la extensión lineal promedio y sus variaciones son indicadores

de los diferentes estresores a los que las colonias se exponen, incluyendo cambios extremos en la TSM.

Debido a que la densidad esquelética está correlacionada negativamente con la extensión lineal (Buddemeier, 1974; Dodge y Brass, 1984), es de esperarse que su respuesta a cambios en la TSM sea inversa a la encontrada para la tasa de crecimiento. Pocos estudios han sido realizados para evaluar el comportamiento anual e interanual de la densidad en relación con la TSM (Cohen *et al.*, 2004), pero sus variaciones estacionales (análisis de bandas de alta y baja densidad) han sido ampliamente estudiadas (Highsmith, 1979; Isdale, 1981; Hudson, 1981; Lough y Barnes, 1990 a y b; Barnes y Lough, 1993; Cruz-Piñón *et al.*, 2003)

El efecto de la temperatura sobre la tasa de calcificación, ha sido claramente demostrado, pero en muchos casos no se ha podido distinguir del efecto causado por la disponibilidad de luz, factor que también es determinante en la calcificación de corales (Barnes y Crossland, 1980; Yap y Gómez, 1984; Loya, 1985). A pesar de esto, otros autores han señalado que los procesos de calcificación en corales, tanto zooxantellados como azooxantellados, son dependientes principalmente de la temperatura, con máximos de calcificación en corales tropicales bajo condiciones de máxima TSM normal de verano (Clausen y Roth, 1975; Marshall, 1996; Lough y Barnes, 2000; Marshall y Clode, 2004). Mas recientemente se ha encontrado que las tasas de calcificación disminuyen rápidamente al aproximarse a las temperaturas máximas de verano y esto tiene importantes implicaciones en el crecimiento de corales relacionados con el aumento de la TSM, como consecuencia del cambio climático global (Marshall y Clode, 2004).

El objetivo de este estudio es analizar como los parámetros de crecimiento responden a cambios ambientales, específicamente cambios en la TSM, y a largo plazo a los forzamientos atmosféricos extratropicales, tales como PNA, NAO y PDO. De esta manera, es posible utilizar los parámetros de crecimiento como trazadores de estos forzamientos, mostrando ventajas sobre

los registros geoquímicos, en términos de costos y el relativo poco tiempo de análisis.

3.2 Materiales y Métodos

Para el estudio de crecimiento, se utilizó un núcleo coral de la especie *Montastraea faveolata* colectado en la Isla Anegada de Adentro localizada en el Sistema Arrecifal Veracruzano (SAV). Las dimensiones del núcleo obtenido fueron de aproximadamente 2003 mm de longitud, con grosor promedio de 0.945 cm (SD = 0.022). Después del seccionado del núcleo, de donde se obtuvieron lajas de ~ 8 mm de grosor, fueron utilizadas para el estudio de tasas de crecimiento esquelético, densidad esquelética y tasas de calcificación anuales como trazadores de condiciones ambientales locales, específicamente de la TSM.

Las lajas limpias fueron radiografiadas para revelar el patrón de bandas de densidad de crecimiento esquelético. En cada radiografía se incluyó una cuña escalonada de aragonita (estándar de aragonita) y dos barras de aluminio de grosor homogéneo, ambas bajo las especificaciones propuestas por Carricart-Ganivet y Barnes (2007). Estas barras fueron empleadas como estándares de densidad y usadas para calcular la densidad óptica esquelética y tasa de calcificación (Fig. 3.1). Las radiografías fueron digitalizadas (escaneadas) y analizadas con la ayuda del programa CoralXDS (Coral X-Radiograph Densitometry System del National Coral Reef Institute y Nova Southeastern University Oceanographic Center, Helmle *et al.*, 2002). Los resultados de tasa de crecimiento y modelo de edad, obtenidos por este procedimiento fueron contrastados contra el modelo de edad calculado a partir del conteo manual de las bandas y finalmente estas cronologías fueron ajustadas con ayuda de una variable de segundo orden, usando el registro geoquímico de Sr/Ca, el cual muestra el ciclo anual bien definido y permite definir claramente el ciclo estacional.

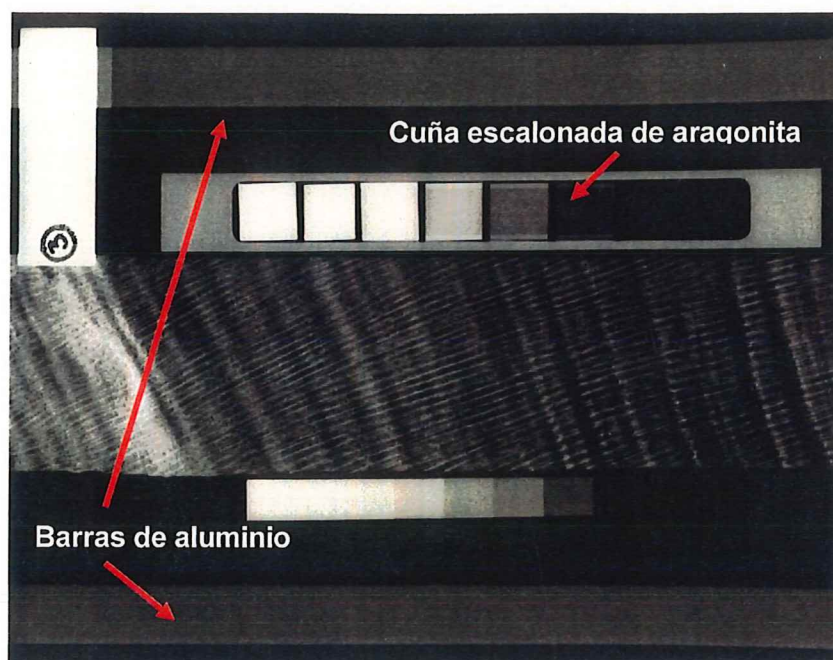


Figura 3.1. Imagen digital de rayos x de una laja de *Montastraea faveolata* del SAV, mostrando la cuña escalonada de aragonita (estándar de aragonita) y las barras de aluminio utilizadas para la corrección del efecto tacón.

La cronología manual se realizó dibujando, sobre una hoja de acetato, el contorno de la radiografía de cada laja y trazando los límites de las bandas de crecimiento (banda de alta y baja densidad por cada año) (Knutson et al., 1972). Posteriormente, se trazaron transectos para la medición de la distancia entre una banda de alta densidad y la siguiente (crecimiento anual), siguiendo el eje de máximo crecimiento, iniciando desde la parte más reciente hasta la parte final del núcleo.

La densidad esquelética y tasas de calcificación se calcularon siguiendo la metodología descrita por Carricart-Ganivet y Barnes (2007). La densidad óptica (*DO*) fue calculada por densitometría de imágenes digitalizadas de rayos x, manejada en el programa CoralXDS (Helmle et al., 2002). Al igual que la cronología manual, las mediciones de *DO* se realizaron a lo largo de cada laja siguiendo el eje de máximo crecimiento en transectos de 4 mm de ancho y

paralelamente se hicieron transectos a lo largo de las barras de aluminio y sobre las cuñas escalonadas de aragonita.

Los datos de densidad óptica obtenida de la cuña escalonada de aragonita y del transecto de la laja de coral fueron procesados para eliminar el efecto "tacón" producido por los rayos x, que es el efecto generado por la variación en la intensidad de energía de los rayos x, a lo largo del eje ánodo-cátodo y que no esta asociado con la ley del cuadrado inverso (Carricart-Ganivet y Barnes, 2007).

Los valores de densidad óptica de la barra de aluminio fueron transformados a su logaritmo natural ($\ln DO$) y graficados contra la distancia (d). Posteriormente, los estos datos fueron ajustados con un polinomio de segundo grado y los coeficientes de determinación (r^2) calculados de estos ajustes fueron en promedio de 0.98. Del polinomio de segundo grado se obtuvo la ecuación:

$$\ln DO = ad^2 - bd + c \quad (1)$$

Donde a , b y c son las constantes del ajuste polinomial. El valor mínimo de $\ln DO$ ($\ln DO_{\min}$) ocurre cuando

$$d = b / 2a \quad (2)$$

Las ecuaciones 1 y 2 fueron utilizadas para calcular el factor de corrección (ecuación 4) por el efecto tacón en los transectos de la laja de coral y la cuña escalonada de aragonita. Como el factor de corrección (Factor corrección_d) es:

$$Factor\ corrección_d = \ln DO_d / \ln DO_{\min} \quad (3)$$

Entonces,

$$Factor\ corrección_d = \frac{ad^2 - bd + c}{a(b/2a)^2 - b(b/2a) + c} \quad (4)$$

Los valores corregidos de densidad óptica fueron transformados a densidad (g cm^{-3}), utilizando un ajuste lineal de la densidad óptica ($\ln DO$) de la cuña escalonada de aragonita. Los valores de densidad (ρ) y de grosor (χ) de cada escalón de estándar, se obtuvo de la siguiente ecuación:

$$\rho\chi = \ln DO - \beta / \alpha \quad (5)$$

Donde α y β son las constantes de la relación lineal. Entonces por asociación, es posible calcular la densidad de la laja de coral a partir de la densidad óptica usando la siguiente ecuación:

$$\rho_{laja\ coral} = (\ln DO_{laja\ coral} - \beta / \alpha) / \chi_{laja\ coral} \quad (6)$$

Las distancias de los transectos inclinados (debido a la disposición de las coralitas en la laja) también fueron corregidas. Para eliminar el error entre la distancia del transecto y la de la barra de aluminio, se calculó el ángulo de inclinación (θ) del transecto, mediante la ecuación:

$$Dist.real = \cos \theta * Dist.medida \quad (7)$$

Finalmente, la tasa de calcificación anual ($\text{g cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$) se calculó multiplicando la densidad obtenida para el promedio de la banda de crecimiento, por el ancho (extensión lineal o tasa de crecimiento) de cada respectiva banda.

Para determinar el efecto de los factores ambientales, principalmente la TSM, las series de tiempo de estos parámetros fueron comparadas contra el registro de Sr/Ca del mismo coral (ver Capítulo 2). El efecto de los principales forzamientos atmosféricos, que muestran una influencia en la región (Capítulo 2) sobre el crecimiento de los corales fue analizada, comparando el

comportamiento de la tasa de crecimiento a largo plazo contra las señales del patrón Pacífico/Norte América (PNA) (Wallace y Gutzler, 1981), la Oscilación del Atlántico Norte (NAO) (Hurrell *et al.*, 2003) y la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) (Mantua *et al.*, 1997).

3.3 Resultados y Discusión

En este estudio se contrastó los parámetros de crecimiento (tasa de crecimiento esquelético, densidad esquelética y tasa de calcificación) de *Montastraea faveolata* del SAV contra la TSM, así como con diversos forzamientos climáticos de gran escala temporal y espacial como el PNA, la NAO y la PDO, que potencialmente afectan a la región sur del GM.

3.3.1 Tasa de Crecimiento esquelético

La tasa de crecimiento promedio anual de *M. faveolata* del SAV fue de 11.04 mm año⁻¹ (SD = 2.2 mm año⁻¹), variando entre una tasa máxima de 16 mm año⁻¹ y una mínima de 6 mm año⁻¹. Esta es una variación un poco mayor, pero dentro del intervalo de tasas de extensión lineal de 10 a 15 mm año⁻¹, considerada como de crecimiento bajo condiciones óptimas (Buddemeier y Kinzie, 1976). El coral *M. faveolata* del SAV mostró una tasa de crecimiento esquelético altamente variable, mostrando un incremento cuando las anomalías de Sr/Ca son negativas (anomalías de TSM positivas) (Fig. 3.2). En general, tanto para corales del Atlántico como *Montastraea*, así como para otros géneros de coral del Pacífico, tales como *Porites*, los diversos estudios han encontrado que la tasa de extensión lineal responde de manera directa a la TSM (Dodge y Lang, 1983; Slowey y Crowley, 1995, Lough y Barnes 1997). Sin embargo, los resultados de este estudio contrastan con lo reportado para el sur del Golfo de México por Carricart-Ganivet (2004). A diferencia de lo que muestra *M. faveolata* del SAV, este autor encontró una relación inversa entre la TSM y la tasa de crecimiento de *M. annularis*, diferencia que puede deberse a que en su

trabajo uso la tasa de crecimiento promedio de colonias de diferentes localidades, ubicadas a lo largo de un gradiente de temperatura, pero no corresponde a la respuesta de una colonia a las variaciones de TSM.

Nuestros resultados muestran que la correlación anual entre tasa de crecimiento esquelético y TSM es baja ($r = -0.214$), lo que indica que otros factores tanto biológicos como ambientales, pueden estar influenciando y controlando el crecimiento del coral a corto plazo. Sin embargo, la relación en escalas decadales-interdecadales tiende a aumentar ($r = -0.441$), como se observa con la media móvil de 11 años de ambas variables (Fig. 3.2), lo que sugiere que variaciones de baja frecuencia en la TSM juegan un papel más importante en el control del crecimiento a largo plazo.

Una característica relevante del este registro, es la caída abrupta en la tasa de crecimiento (promedio 8.28 mm año^{-1}) entre 1956 y 1973, que también es coincidente con un periodo de disminución en las tasas de crecimiento de *Montastraea annularis* del Flower Garden Banks, en la costa de Texas-Louisiana al norte del Golfo de México, (Dodge y Lang, 1983; Slowey y Crowley, 1995). Esto sugiere que, durante ciertos periodos, los eventos que producen anomalías negativas de TSM pueden extenderse a lo largo de todo el Golfo. De igual manera los resultados de esos estudios muestran que la variabilidad de largo plazo (decadal-multidecadal) de la tasa de crecimiento de *M. annularis* está modulada por la TSM, principalmente para esa región las anomalías de invierno (Dodge y Lang, 1983; Slowey y Crowley, 1995). Mientras que *M. faveolata* del SAV responde más a anomalías negativas de TSM (Sr/Ca positivo) de verano.

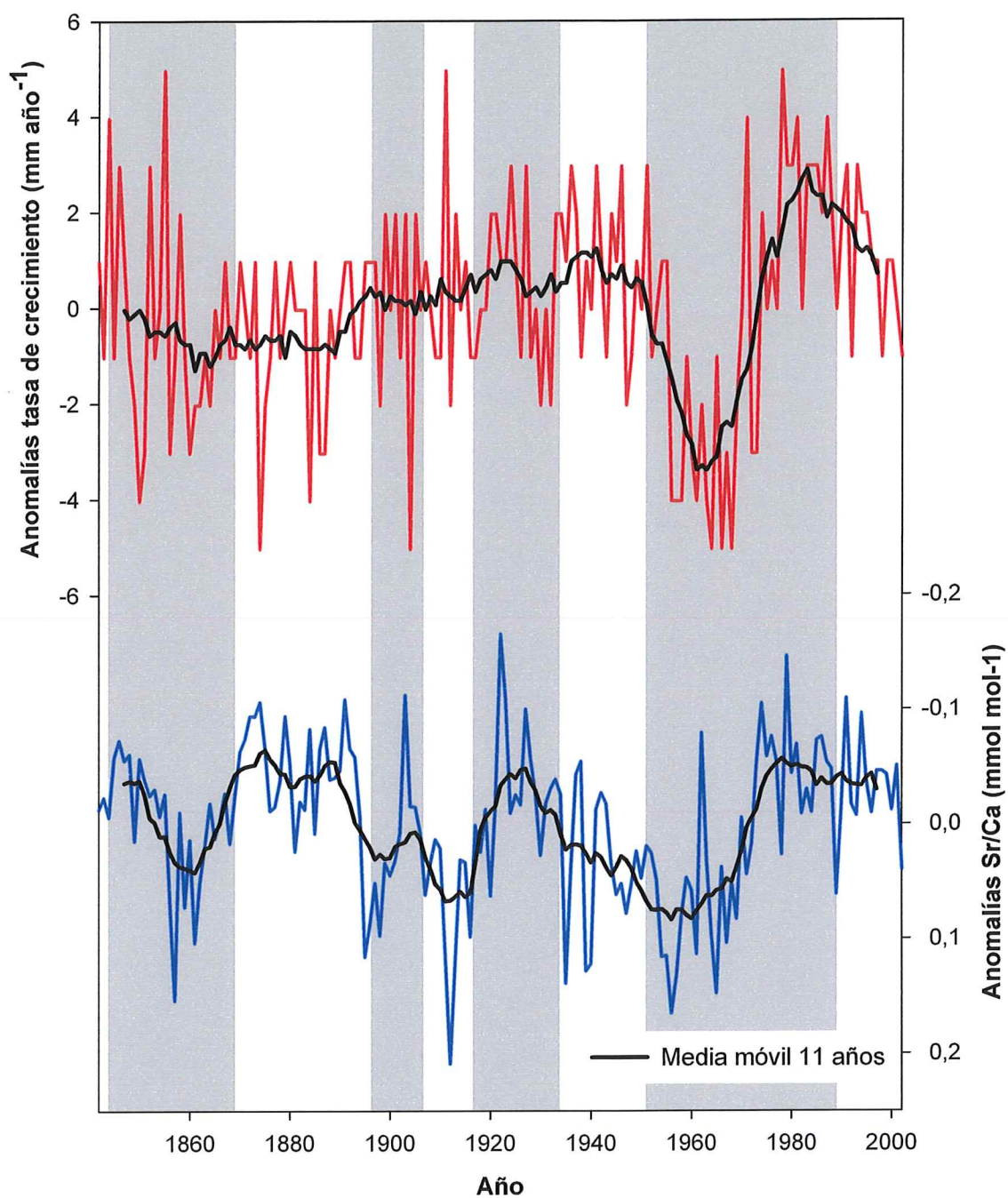


Figura 3.2. Comparación de las anomalías de tasa de crecimiento esquelético anual de *Montastraea faveolata* del SAV y las anomalías de Sr/Ca de verano. Las barras grises muestran los periodos en los que las coincidencias entre las dos señales aumentan.

3.3.2 Densidad esquelética

La densidad esquelética promedio anual fue de 1.059 g cm^{-3} (SD = 0.13 g cm^{-3}) con un valor máximo de 1.559 g cm^{-3} y un mínimo de 0.793 g cm^{-3} . La densidad promedio calculada para *M. faveolata* en este estudio, es más baja la densidad promedio de 1.47 g cm^{-3} reportada para *M. annularis* en la misma localidad, para el periodo de 1972 a 1991 (Carricart-Ganivet, 2004). Al tratarse de especies diferentes, estas diferencias pueden deberse a diferencias interespecíficas en densidad esquelética y a la escala de tiempo considerada en ambos estudios (la densidad promedio en este trabajo fue calculada utilizando un registro de 160 años). A diferencia de la tasa de crecimiento, la densidad disminuyó cuando las anomalías de Sr/Ca fueron negativas (anomalías de TSM positivas) (Fig. 3.3). Este resultado contrasta con lo reportado en *Diploria labyrinthiformis* de Bermudas y *M. annularis* del sur del Golfo de México, donde la densidad esquelética muestra una respuesta positiva a anomalías positivas de TSM (Cohen et al., 2004; Carricart-Ganivet (2004).

La respuesta inversa de la densidad, respecto a la de la tasa de crecimiento esquelética, sugiere que corales que crecen en ambientes de alta tasa de sedimentación, baja disponibilidad de luz e influencia antropogénica, como en el SAV, sacrifican densidad esquelética para mantener altas tasas de extensión lineal (Carricart-Ganivet y Merino, 2001). Adicionalmente, estos resultados demuestran la relación inversa entre tasa de extensión lineal y densidad (Lough y Barnes, 2000; Carricart-Ganivet, 2004). La correlación anual entre la densidad y TSM fue muy baja ($r = 0.145$), lo que indica que los parámetros de crecimiento de *M. faveolata* del SAV pueden estar controlados por otras variables que afectan la densidad a corto plazo. Sin embargo, de manera similar que la tasa de crecimiento, la relación en escalas decadales-interdecadales también tiende a aumentar ($r = 0.394$), lo que muestra que la TSM puede ser uno de los principales mecanismo de control de los parámetros de crecimiento, como la densidad, en la escala temporal de baja frecuencia.

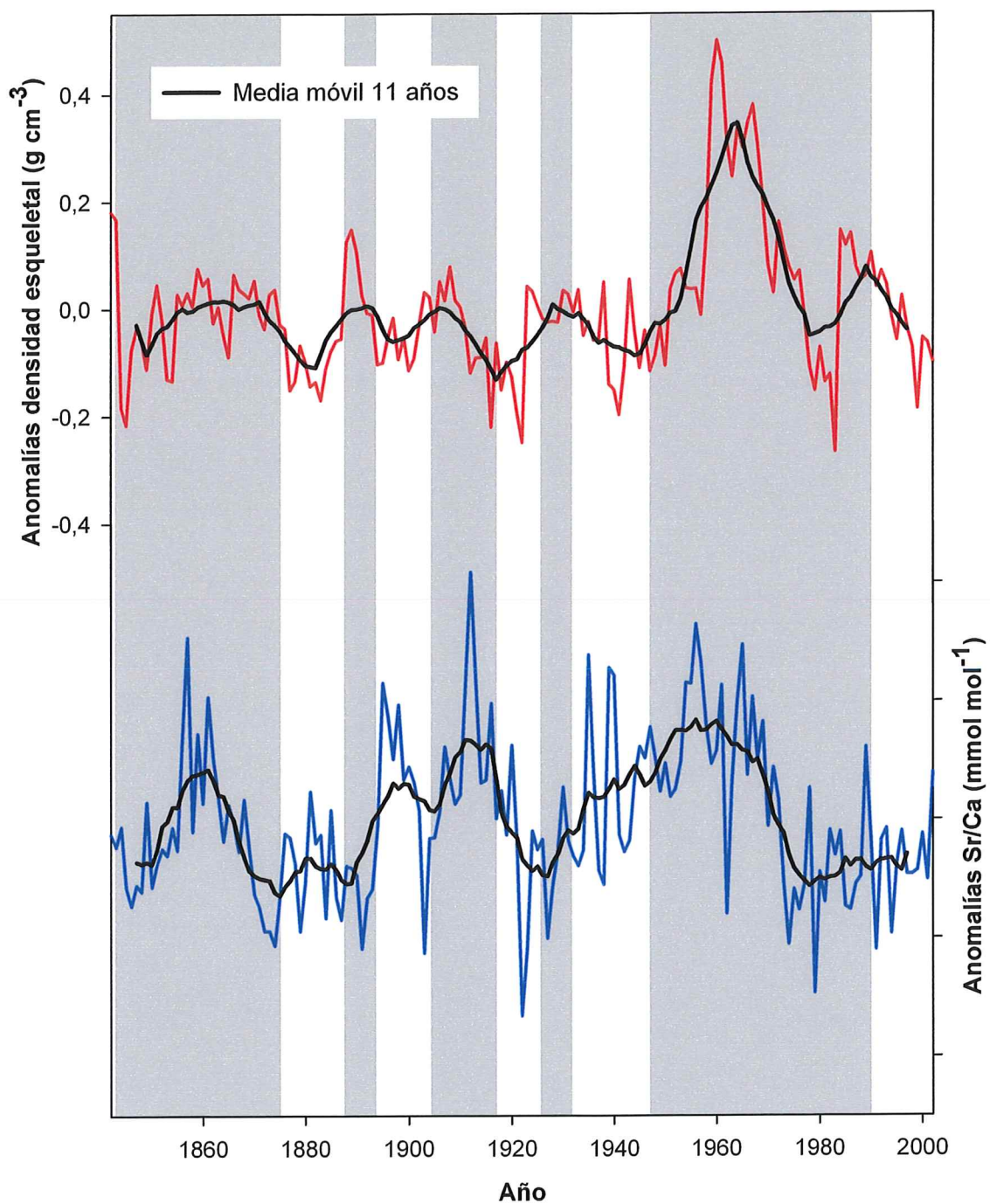


Figura 3.3. Comparación de las anomalías de densidad esquelética anual de *Montastraea faveolata* del SAV con las anomalías de Sr/Ca de verano. Las barras grises muestran los periodos en que las coincidencias entre las dos señales aumentan.

3.3.3 Tasa de calcificación

La tasa de calcificación promedio anual calculada fue de $1.159 \text{ g cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$ (SD = $0.227 \text{ g cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$) con una tasa máxima de $1.739 \text{ g cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$ y una mínima de $0.649 \text{ g cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$. Debido a la dependencia en la densidad, la tasa de calcificación promedio también es más baja que la calcificación promedio de $1.31 \text{ g cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$ reportada para el periodo de 1972 a 1991 en *M. annularis* de la misma localidad (Carricart-Ganivet, 2004).

También, debido a la dependencia con la tasa de crecimiento, las anomalías en la tasa de calcificación anual muestran un incremento cuando las anomalías de Sr/Ca son negativas (anomalías de TSM positivas) (Fig. 3.4); resultados que son consistentes con lo reportado para *M. annularis* del sur del Golfo de México y Caribe (Graus y Macintyre, 1982; Dodge y Brass, 1984; Carricart-Ganivet, 2004) y corales del género *Porites* del Indo-Pacífico (Lough y Barnes, 2000).

La correlación en escala anual ($r = -0.163$) y decadal-interdecadal ($r = -0.264$) fue baja, mostrando que la tasa de calcificación de *M. faveolata* del SAV parece no estar siendo modulada por la TSM. La tasa de calcificación en una de las variables de comportamiento más complejo, debido a que esta puede estar controlada por factores diversos como disponibilidad de luz, la presencia y densidad de zooxantellas, la TSM, la disponibilidad de nutrientes, entre otros (Goreau, 1961; Coles y Jokiel, 1978; Goreau et al., 1979; Marubini y Davies, 1996; Marubini y Thake, 1999). Se ha encontrado que la calcificación aumenta con el incremento de la temperatura hasta un óptimo termal, de 1 a 2 °C por abajo del máximo normal de temperatura de verano y luego decrece significativamente con aumentos posteriores de la temperatura (Houck et al., 1977; Coles y Jokiel, 1978; Marshall y Clode, 2004).

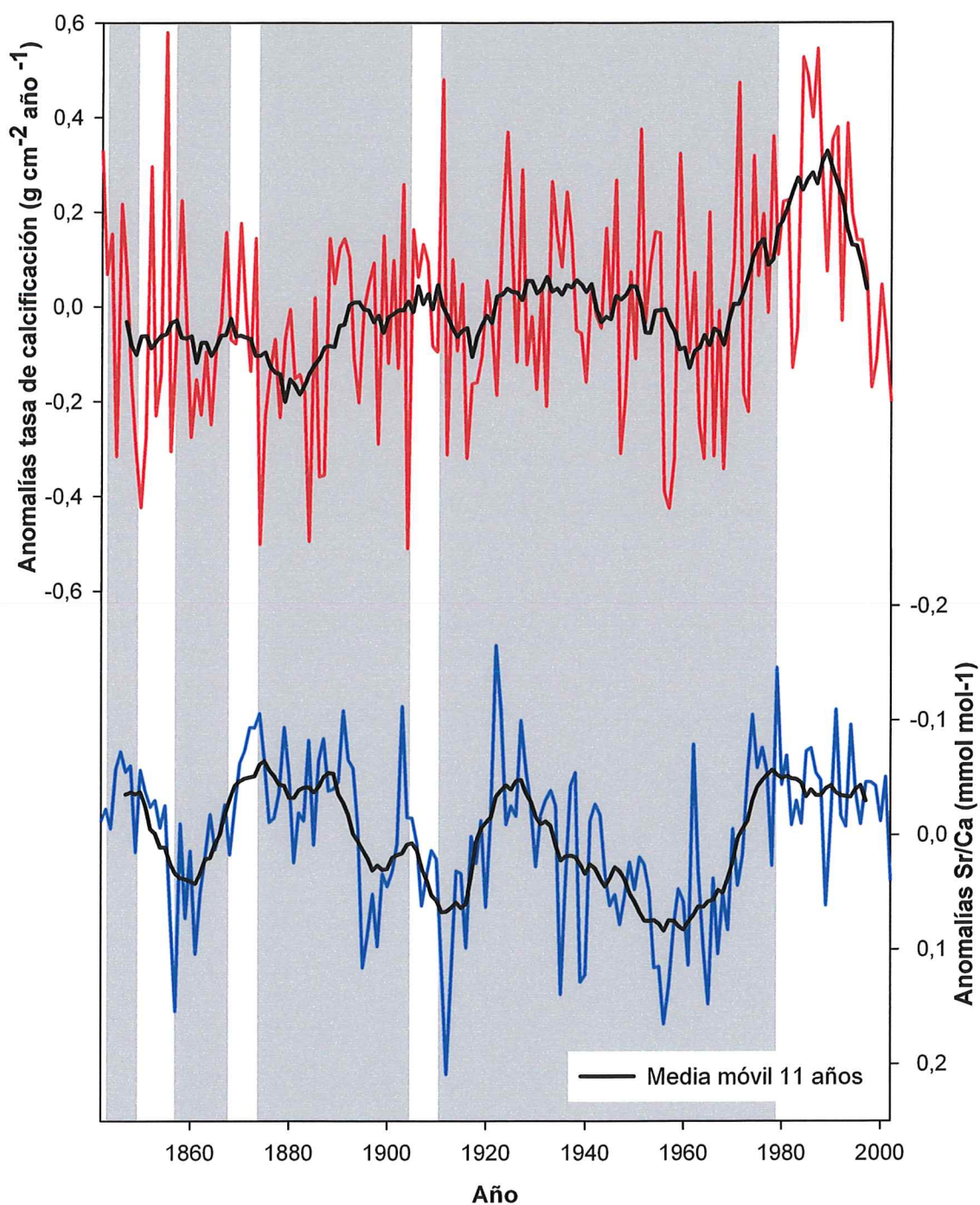


Figura 3.4. Comparación de las anomalías de tasa de calcificación anual de *Montastraea faveolata* del SAV con las anomalías de Sr/Ca de verano. Las barras grises muestran los periodos en que las coincidencias entre las dos señales aumentan.

3.3.4 Crecimiento de coral y la circulación atmosférica

La tasa de crecimiento esquelético responde a las variaciones de Sr/Ca (variaciones de TSM) en escala decadal-interdecadal, así como las variaciones de baja frecuencia en la razón Sr/Ca en el sur del Golfo de México mostraron su dependencia con los forzamientos atmosféricos de gran escala espacial y temporal, como son el PNA, la NAO y la PDO (ver capítulo 2). Por tanto, esta relación indica que la tasa de crecimiento también está siendo modulada por los forzamientos atmosféricos de largo plazo que operan en la región. Las correlaciones totales de 0.714, 0.600 y 0.612, de la tasa de crecimiento con el PNA, la NAO y la PDO, respectivamente, son altamente significativos ($\alpha < 0.5$) (Fig. 3.5, 3.6 y 3.7). Aunque existen pocos estudios donde han utilizado los parámetros de crecimiento como trazadores de cambios en circulación atmosférica de baja frecuencia, estos han demostrado ser herramientas útiles para registrar dichos cambios (Slowey y Crowley, 1995; Cohen *et al.*, 2004). Las anomalías de densidad esquelética de *Diploria labyrinthiformis* registraron muy bien los cambios de TSM inducidos por la NAO en Bermudas (Cohen *et al.*, 2004). De la misma manera la tasa de crecimiento de *M. annularis* del Flower Garden Banks respondió a la variabilidad inducida por el PNA (Slowey y Crowley, 1995).

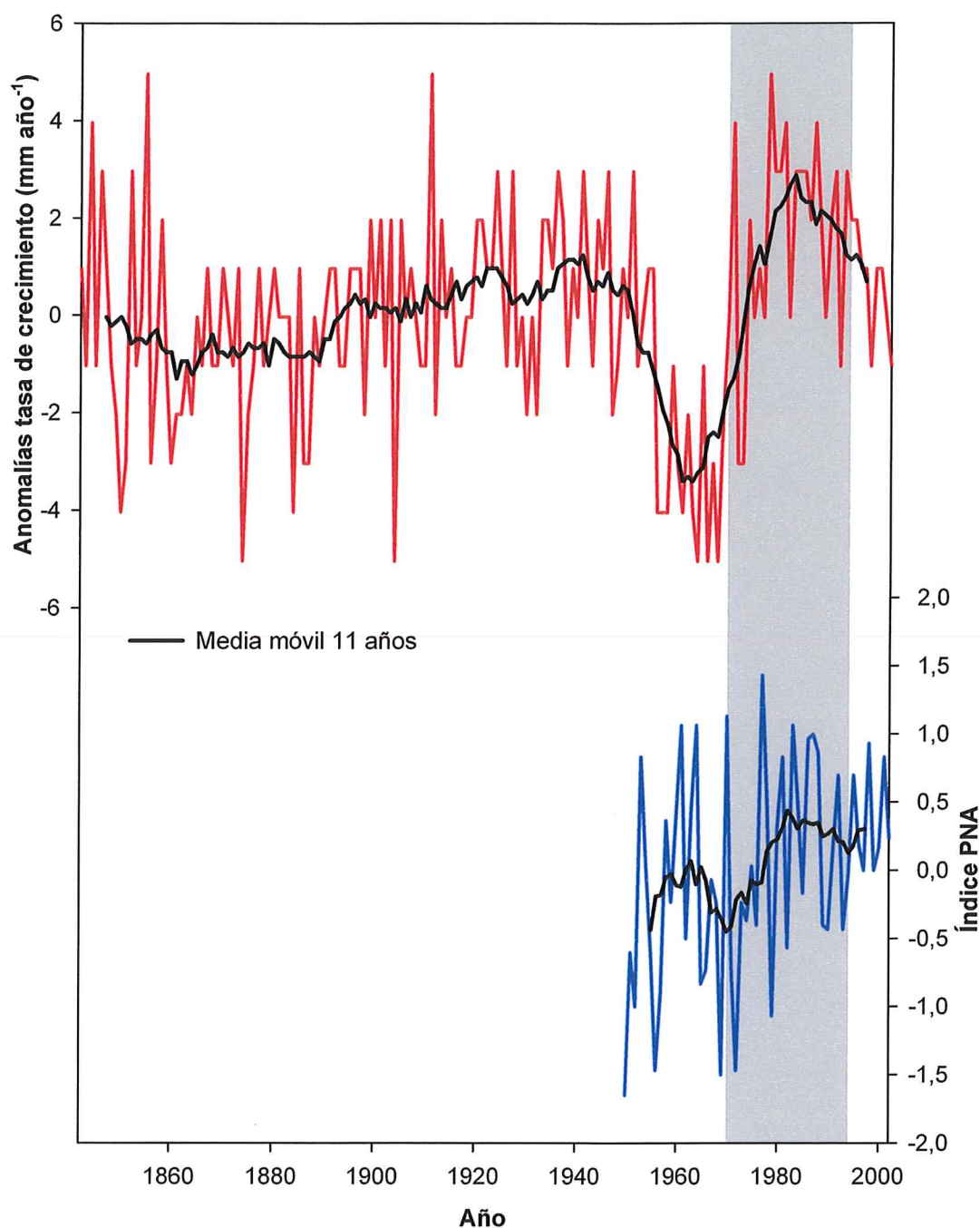


Figura 3.5. Comparación de las anomalías de tasa de crecimiento esquelético anual de *Montastraea faveolata* del SAV con el índice PNA de invierno. La variación de baja frecuencia de ambos registros se muestra utilizando una media móvil de 11 años. Las barras grises muestran los periodos en que las coincidencias entre las dos señales aumentan.

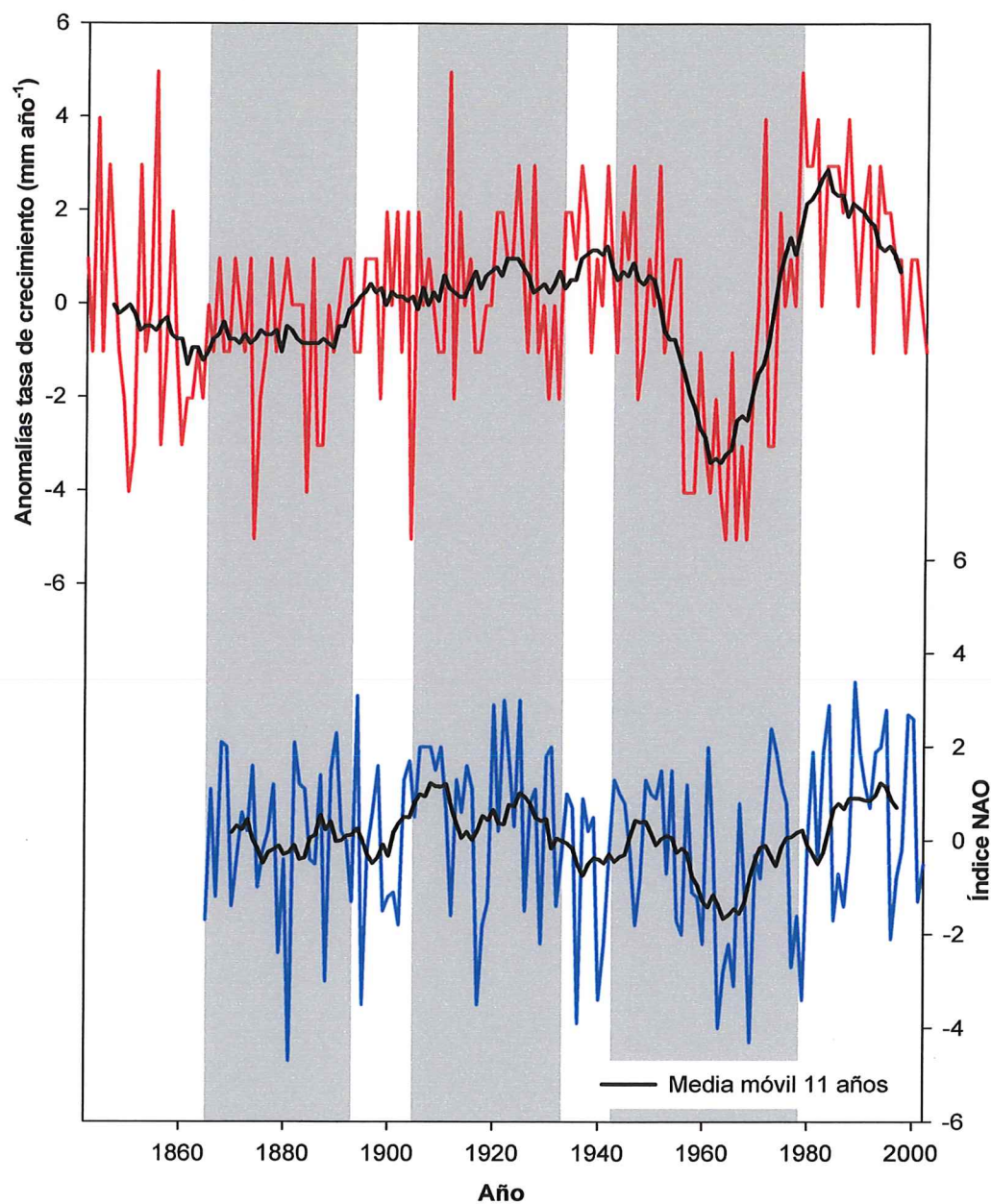


Figura 3.6. Comparación de las anomalías de tasa de crecimiento esquelético anual de *Montastraea faveolata* del SAV con el índice NAO de invierno. La variación de baja frecuencia de ambos registros se muestra utilizando una media móvil de 11 años. Las barras grises muestran los periodos en que las coincidencias entre las dos señales aumentan.

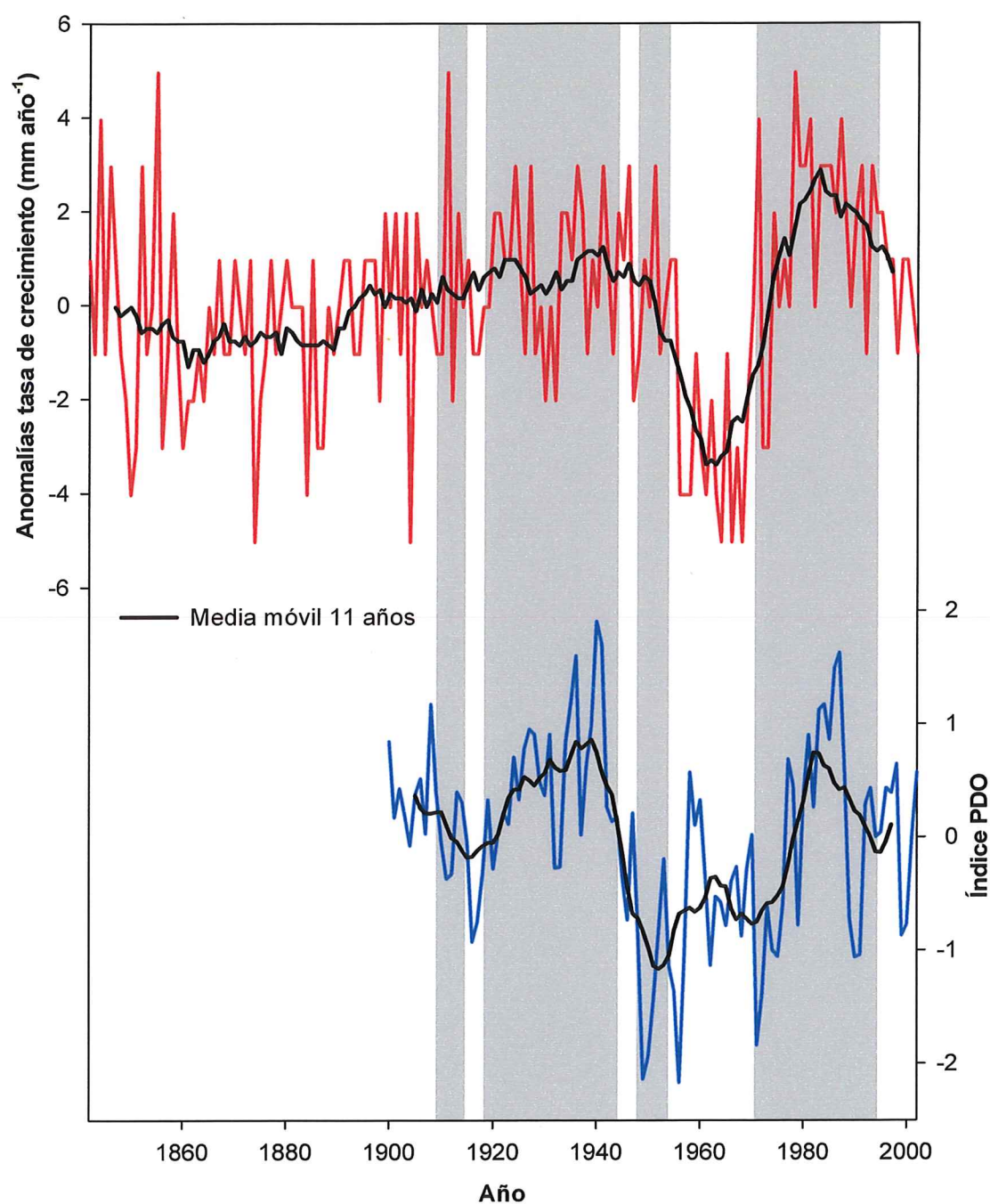


Figura 3.7. Comparación de las anomalías de tasa de crecimiento esquelético anual de *Montastraea faveolata* del SAV con el índice PDO de invierno. La variación de baja frecuencia de ambos registros se muestra utilizando una media móvil de 11 años. Las barras grises muestran los periodos en que las coincidencias entre las dos señales aumentan.

3.4 Conclusiones

Los parámetros de crecimiento (tasa de crecimiento, densidad y tasa de calcificación) de *Montastraea faveolata* del SAV muestran baja correlación con la TSM (reconstruida por la razón Sr/Ca), en escala de tiempo anual, lo que sugiere que otras variables tanto ambientales como biológicas, pueden ejercer un control sobre el crecimiento a corto plazo.

La tasa de crecimiento y densidad esquelética de *Montastraea faveolata*, responde a las anomalías de Sr/Ca de verano en la escala de tiempo decadal-interdecadal, constituyéndose en trazadores de cambios ambientales, mientras que la tasa de calcificación no muestra una respuesta clara.

La tasa de crecimiento de *M. faveolata* mostró estar modulada por los forzamientos atmosféricos de gran escala espacial y temporal que operan en el sur del Golfo de México (PNA, NAO y PDO), mostrando el potencial que presenta como trazador económico y de fácil estudio (tiempo de análisis) de estos forzamientos.

3.5 Referencias

- Barnes, D.J. y C.J. Crossland. 1980. Diurnal and seasonal variations in the growth of a staghorn coral measured by time-lapse photography. *Limnology and Oceanography* 25: 1113 - 1117
- Barnes, D.J. y J.M. Lough. 1989. The nature of skeletal density banding in scleractinian corals: fine banding and seasonal patterns. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 126: 119 – 134.
- Barnes, D.J. y J.M. Lough. 1993. On the nature and causes of density banding in massive coral skeletons. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 167: 91 – 108.
- Barnes, D.J. y J.M. Lough. 1996. Coral skeletons: storage and recovery of environmental information. *Global Change Biology* 2: 569 – 582.
- Buddemeier, R. 1974. Environmental controls over annual and lunar monthly cycles in hermatypic coral calcification. *Proceeding Second International Symposium of Coral Reefs* 2: 259 - 267

- Buddemeier, R. y R. Kinzie. 1976. Coral Growth. *Oceanography and Marine Biology. An Annual Review*. 14: 183 - 255.
- Buddemeier, R., J.E. Maragos y D.W. Knutson. 1974. Radiographic studies of reef coral exoskeletons: rates and patterns of coral growth. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 14: 179 - 200
- Carricart-Ganivet, J.P. 2004. Sea surface temperature and the growth of the West Atlantic reef-building coral *Montastraea annularis*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* doi:10.1016/j.jembe.2003.10.015.
- Carricart-Ganivet, J.P. y D.J. Barnes. 2007. Densitometry from digitized images of X-radiographs: Methodology for measurement of coral skeletal density. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* doi:10.1016/j.jembe.2006.12.018.
- Carricart-Ganivet, J.P. y M. Merino. 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: 133 – 146.
- Clausen, C.D. y A.A. Roth. 1975. Effect of temperatura and temperatura adaptation on calcification rate in the hermatypic coral *Pocillopora damicornis*. *Marine Biology* 33: 93 - 100
- Cohen, A.L., S.R. Smith, M.S. McCartney y J. van Etten. 2004. How brain corals record climate: an integration of skeletal structure, growth and chemistry of *Diploria labyrinthiformis* from Bermuda. *Marine Ecology Progress Series* 271: 147 – 158.
- Coles, S. L. y P. L. Jokiel. 1978. Synergistic effects of temperature, light and salinity on the coral *Montipora verrucosa*. *Marine Biology* 49: 187 - 195.
- Cruz-Piñón, G., J.P. Carricart-Ganivet y J. Espinoza-Avalos. 2003. Monthly skeletal extension rates of the hermatypic corals *Montastraea annularis* and *Montastraea faveolata*: biological and environmental controls. *Marine Biology* 143: 491– 500.
- Dodge, R.E. y G.W. Brass. 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.
- Dodge, R.E. y J.C. Lang. 1983. Environmental correlates of hermatypic coral (*Montastrea annularis*) growth on the East Flower Gardens Bank, northwest Gulf of Mexico. *Limnology and Oceanography* 28(2): 228 – 240.

- Druffel E. R. M. 1997. Geochemistry of corals: Proxies of past ocean chemistry, ocean circulation and climate. *Proceedings of the National Academy of Science USA* 94: 8354 - 8361.
- Gagan, M.K., L.K. Ayliffe, J.W. Beck, J.E. Cole, E.R.M. Druffel, R.B. Dunbar y D.P. Schrag. 2000. New views of tropical paleoclimates from corals. *Quaternary Science Reviews* 19: 45-64
- Goreau T. F. 1961. Problems of growth and calcium deposition in reef corals. *Endeavour* 20: 32 – 39.
- Goreau T.F., N.I. Goreau y T.J. Goreau. 1979. Coral and coral reefs. *Scientific American* 241: 124 – 136.
- Graus, R.R. y I.G. Macintyre. 1982. Variation in growth forms of the reef coral *Montastrea annularis* (Ellis and Solander): a quantitative evaluation of growth response to light distribution using computer simulation. En: *The Atlantic Barrier Reef Ecosystem at Carrie Bow Cay, Belize*. Rutzler, K. y I.G. Macintyre (Eds.). Smithsonian Institution Press, Washington DC. Pp. 441 – 464.
- Helmle, K.P., K.E. Kohler y R.E. Dodge. 2002. Relative Optical Densitometry and The Coral X-radiograph Densitometry System: CoralXDS. *Int. Soc. Reef Studies 2002 European Meeting*. Cambridge, England. Sept. 4-7. Poster.
- Highsmith, R.C. 1979. Coral growth rates and environmental control of density banding. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 37: 105 - 125
- Houck, J. E., R. W. Buddemier, S. V. Smith y P. L. Jokiel. 1977. The response of coral growth rate and skeletal strontium content to light intensity and water temperature. *Proceeding Third International Symposium of Coral Reefs* 2: 424 – 431.
- Hudson, J.H. 1981. Growth rates in *Montastraea annularis*: a record of environmental change in Key Largo Reef Marine Sanctuary. *Bulletin of Marine Science* 31: 444 – 459.
- Hurrell, J. W., Y. Kushnir, G. Ottersen y M. Visbeck. 2003. An Overview of the North Atlantic Oscillation. En: *The North Atlantic Oscillation: Climatic Significance and Environmental Impact*. *Geophysical Monograph* 134. American Geophysical Union.

- Isdale, P.J. 1981. Geographical variation in the growth rate of the hermatypic coral *Porites* in the Great Barrier Reef Province, Australia. Tesis de doctorado. James Cook University of North Queensland. 141 p.
- Knutson, D.W., R.W. Buddemeier y S.V. Smith. 1972. Coral chronometers: seasonal growth bands in reef corals. *Science*. 177: 270 – 272.
- 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* 110, C09S07, doi:10.1029/2004JC002576.
- Lough, J.M. y D.J. Barnes. 1990a. 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 - 241.
- Lough, J.M. y D.J. Barnes. 1990b. Intra-annual timing of density band formation of *Porites* coral from the central Great Barrier Reef. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 135: 35 - 57.
- Lough, J.M. y D.J. Barnes. 1997. Several centuries of variation in skeletal extension, density and calcification in massive *Porites* colonies from the Great Barrier Reef: A proxy for seawater temperature and a background of variability against which to identify unnatural change. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 211: 29 – 67.
- Lough, J.M. y D.J. Barnes. 2000. Environmental controls on growth of the massive coral *Porites*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 245: 225 – 243.
- Loya, Y. 1985. Seasonal changes in growth rate of a Red Sea coral population. *Fifth International Coral Reef Congress* 1: 187 – 191.
- Mantua N.J., S.R. Hare, Y. Zhang, J.M. Wallace y R.C. Francis. 1997. A Pacific decadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bulletin of the American Meteorological Society* 78: 1069 - 1079.
- Marshall, A.T. 1996. Calcification in hermatypic and ahermatypic corals. *Science* 271: 637 - 639
- Marshall, A.T. y P. Clode. 2004. Calcification rate and the effect of temperature in a zooxanthellate and an azooxanthellate scleractinian reef coral. *Coral Reefs* 23: 218 – 224.

- Marubini F. y P.S. Davies. 1996. Nitrate increases zooxanthellae population density and reduces skeletogenesis in corals. *Marine Biology* 127: 319 – 328.
- Marubini F y B. Thake. 1999. Bicarbonate addition promotes coral growth. *Limnology and Oceanography* 44(3): 716 – 772.
- Slowey, N.C. y T. Crowley. 1995. Interdecadal variability of Northern Hemisphere circulation recorded by Gulf of Mexico corals. *Geophysical Research Letters* 22: 2345 – 2348.
- Wallace, J.M. y D. S. Gutzler. 1981. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter. *Monthly Weather Review* 109: 784 - 812.
- Yap, H.T. y E.D. Gómez. 1984. Growth of *Acropora pulchra* II. Responses of natural and transplanted colonies to temperature and day length. *Marine Biology* 81: 209 – 215.