

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR  
DE ENSENADA**



---

**PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS  
EN ECOLOGÍA MARINA**

---

Estacionalidad y profundidad de calcificación de selectos foraminíferos pláncnicos a partir de su composición isotópica del oxígeno: Implicaciones para la reconstrucción de la variabilidad oceanográfica en el sur del sistema de la Corriente de California

**TESIS**

que para cubrir parcialmenté los requisitos necesarios para obtener el grado de  
**MAESTRO EN CIENCIAS**

Presenta:

Daniela Rabiela Alonso

Ensenada, Baja California, México, 2012

TESIS DEFENDIDA POR

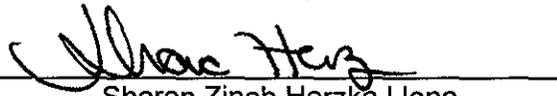
**Daniela Rabiela Alonso**

Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ



Juan Carlos Herguera García

*Director del Comité*



Sharon Zinah Herzká Llona

*Miembro del Comité*



Julio Candela Pérez

*Miembro del Comité*



Betha Eugenia Lavaniegos Espejo

*Coordinador del programa de posgrado  
en Ecología Marina*



Dr. David Hilario Covarrubias Rosales

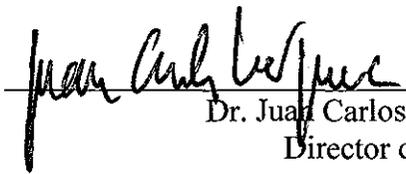
*Director de Estudios de Posgrado*

29 de febrero de 2012

**Resumen** de la tesis de **Daniela Rabiela Alonso**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIAS en ECOLOGÍA MARINA. Ensenada, Baja California, México. Febrero 2012.

**Estacionalidad y profundidad de calcificación de selectos foraminíferos pláncnicos a partir de su composición isotópica del oxígeno: Implicaciones para la reconstrucción de la variabilidad oceanográfica en el sur del sistema de la Corriente de California**

Resumen aprobado por:

  
Dr. Juan Carlos Herguera  
Director del comité

Elaboramos un índice de la estratificación de la capa de mezcla que nos permita reconstruir la variabilidad climática en el sur del Sistema de la Corriente de California (SCC). Este índice está basado en la composición isotópica del oxígeno en los caparazones calcíticos de selectos foraminíferos pláncnicos y su fidelidad la evaluamos con series de tiempo de la columna de agua. Con este objetivo, se colectaron muestras de sedimentos de muy alta resolución en cuatro localidades: Cuenca San Lázaro localizada al sur del Sistema de la Corriente California, Cuenca Pescadero, Cuenca el Carmen y Cuenca Bahía de la Paz localizadas en el Golfo de California. Estas cuatro cuencas comparten una serie de características comunes que son: (i) una alta tasa de sedimentación biogénica y litogénica, (ii) la presencia de sedimentos laminados debido a que están bañadas por aguas muy pobres en oxígeno disuelto lo que favorece su excelente preservación en los taludes de estas cuencas a profundidades comprendidas entre los 400 a 600 m. Estas localidades a su vez difieren en una variable fundamental que es la amplitud estacional de las características físicas de la capa de mezcla. Se identificaron tres especies de foraminíferos pláncnicos *Globigerinoides ruber s.s*, *Globigerina bulloides* y *Neogloboquadria dutertrei* y se determinaron las composiciones isotópicas del oxígeno para cada especie y en varias muestras de cada localidad por espectrometría de masas. Los valores de las determinaciones isotópicas de cada especie se relacionaron con los perfiles estacionales de las composiciones isotópicas del oxígeno en la calcita en equilibrio derivada para cada localidad a partir de los datos de temperatura y salinidad obtenidos de WODV y la ecuación Bemis *et al.* (1998). Comparando los perfiles estacionales de las composiciones isotópicas de oxígeno calculadas para la columna de agua con las composiciones isotópicas de oxígeno determinadas a partir de los foraminíferos pláncnicos, se estimó el intervalo de profundidad de calcificación y estacionalidad de las tres especie de foraminíferos. Se observó una importante consistencia entre el intervalo de profundidades de calcificación y estacionalidad de la columna de agua de las tres especies de foraminíferos pláncnicos en las cuatro localidades. Las observaciones muestran como *G.ruber s.s* y *N.dutertrei* calcifican

principalmente durante el verano en superficie y profundidad respectivamente por lo que proponemos que las diferencias en sus composiciones isotópicas de oxígeno entre estas dos especies pueden utilizarse como indicadores de la estratificación de la capa de mezcla en verano. Por otro lado, las diferencias isotópicas entre las dos especies refleja a su vez la diferencia en la densidad del agua entre ambos intervalos de profundidad de calcificación de cada una de las especies. Ya que, la composición isotópica de oxígeno en equilibrio calculada depende de la salinidad y temperatura, variables que a su vez controlan la densidad de las masas de agua.

Para validar este índice de la estratificación de la capa de mezcla se realizó una reconstrucción de una serie de tiempo con las diferencias en la composición isotópica de oxígeno entre *G.ruber s.s* y *N.dutertrei* de un registro sedimentario que abarcan los últimos 50 años de la cuenca de San Lázaro. Esta serie se comparó con una reconstrucción instrumental de las anomalías de temperatura en el Ecuador (ENOA) (Índice El Niño - Oscilación Austral) para los últimos 50 años. Se observó un importante relación entre la reconstrucción isotópica y el índice ENOA lo que implica la conexión entre los fenómenos de *El Niño* y *La Niña* y la estratificación de la capa de mezcla, lo cual valida la utilización de este índice de la estratificación de la capa de mezcla durante el verano en la región meridional del sistema de la Corriente de California.

Basándonos en esta validación se realizó una reconstrucción de la estratificación de la capa de mezcla de un registro sedimentario que abarca los últimos 400 años en la Cuenca de San Lázaro y se comparó con una reconstrucción de las anomalías de presión en el Ecuador (ISA) Índice de la Oscilación Austral en el Ecuador reconstruida por Jones y Mann (2004), y con una reconstrucción de las anomalías de temperatura del Hemisferio Norte (HN) reconstruida por Mann *et al.* (1998), para poder interpretar que procesos océano-climáticos influyen en la variación oceanográfica observada en el sur del sistema de la Corriente de California durante los últimos 400 años. En la primera comparación se observó una misma tendencia entre las dos reconstrucciones, en la segunda comparación se observó una relación negativa entre la diferencia de densidad y las anomalías de temperatura del HN lo que implica que la variabilidad océano-climática de la región meridional del sistema de la Corriente de California obedece por un lado al gradiente de presión del Hemisferio Norte y por otro lado a la variación océano-climática en el Ecuador o a la interacción de estos.

Palabras claves: Foraminíferos plánticos, composición isotópica del oxígeno ( $\delta^{18}\text{O}$ ), variabilidad oceanográfica del SCC

**Abstract** of the thesis presented by **Daniela Rabiela Alonso** as a partial requirement to obtain the MASTER OF SCIENCE degree in MARINE ECOLOGY. Ensenada, Baja California, México. February 2010.

**Seasonal and calcification depth of selected planktonic foraminifera from the oxygen isotopic composition: Implications for the reconstruction of oceanographic variability in the south of the Current California system**

We develop an index of the mixed layer stratification that allows us to reconstruct climate variability in the south of the California Current System (CCS). This index is based on the isotopic composition of oxygen in the calcite shells of planktonic foraminifera selected and evaluated its fidelity with the time series of water column.

To this aim, we collected sediments samples of ultrahigh resolution in four locations: San Lázaro basin in the southern domain of the California Current System (CCS), Pescadero basin, El Carmen basin and Bahía de la Paz basin in the Gulf of California. These four basins share some common features: i) High biogenic and lithogenic sedimentation rate, ii) the presence of laminated sediments because they are bathed by waters poor in dissolved oxygen which favors its excellent preservation in the slopes of these basins at depths between 400 to 600 m. These locations differ in a fundamental variable in the seasonal amplitude of the physical characteristics of the mixed layer.

We identified three planktonic foraminifera species *Globigerinoides ruber ss*, *Globigerina bulloides* and *Neogloboquadrina dutertrei* and determined the oxygen isotopic compositions for each species and in several samples of each location by mass spectrometry.

The values of the isotopic determinations of each species were related to seasonal patterns of oxygen isotopic compositions of calcite in equilibrium for each site derived from the temperature and salinity data obtained from the World Ocean Data View and Bemis *et al.* (1998) equation.

Comparing the seasonal patterns of oxygen isotopic compositions calculated for the water column with oxygen isotope compositions determined from planktonic foraminifera, was estimated calcification depth range and seasonality of the three species of foraminifera. There is substantial consistency between the calcification depth range and seasonality of the water column of the three species in planktonic foraminifera in the four locations. Observations show as *G. ruber s.s* and *N. dutertrei* calcify mainly during the summer in surface and depth respectively, we propose that the differences in their oxygen isotopic compositions between these two species can be used as indicators of stratification layer mixed in summer. Furthermore, the isotopic differences between the two species in turn reflect the difference in density between water depth intervals of calcification of each species. Since, the isotopic composition of oxygen calculated equilibrium depends on the salinity and temperature variables which in turn control the density of water mass.

To validate the mixed layer stratification index, we made a reconstruction of a time series of the differences in oxygen isotopic composition between *G. ruber s.s* y *N. dutertrei* in the

sediments of the San Lázaro basin for the past 50 years. This series was compared with an instrumental reconstruction at the temperatures anomalies in the Ecuador (ENOA) (El Niño-Austral Oscillation Index) for the past 50 years. There was a significant relationship between the isotopic reconstruction and the ENSO index which means the connection between *El Niño* and *La Niña* and the mixed layer stratification, which validates the use of this index of stratification of the mixed layer during the summer in the southern region of the California Current system. Based on this validation was performed a reconstruction of the mixed layer stratification of a sedimentary record spanning the past 400 years in the San Lazaro basin and was compared with a reconstruction of the pressure anomalies in Ecuador (ISA) Austral Oscillation Index rebuilt by Jones and Mann (2004), as with a reconstructions of the temperature anomalies in the HN rebuilt by Mann (1998).

In the first comparison showed a similar trend between the two reconstructions in the second comparison showed a negative relationship between the difference in density and temperature anomalies HN implying that the ocean-climate variability in southern of the California Current system one hand due to the pressure gradient in the Northern Hemisphere and on the other side of the ocean-climate change in Ecuador or the interaction of these.

Key Words: Plancktonic foraminifera, oxygen isotopes composition ( $\delta^{18}\text{O}$ ), oceanographic variability of the SCC.

## DEDICATORIA

A la vida y a cada una de esas  
pequeñeces y grandezas que te  
hacen sonreír y soñar.

## AGRADECIMIENTOS

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada y al Posgrado en Ecología Marina, por brindarme la oportunidad de estudiar dentro de este centro de investigación.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca (# 260968) para realizar mis estudios de maestría.

Al Dr. Juan Carlos Herguera por la dedicación, paciencia, sabiduría, conocimiento que me ha brindado y transmitido a lo largo de este trabajo en equipo. Gracias Juan.

A la Dra. Sharon Herzka por sus buenas críticas y consejos para el mejoramiento de este trabajo.

Al Dr. Julio Candela por su apoyo y críticas para el mejoramiento de este trabajo.

Al Dr. Tito por brindarme su tiempo y compartirme sus conocimientos para el manejo de los datos.

Al grupo IMECOCAL por proporcionarme los datos de salinidad y temperatura de 1997 y 1999 del sur del sistema de la Corriente de California.

A todos los investigadores, maestros del CICESE por formar parte de mi crecimiento académico y por el conocimiento que cada uno, me transmitió de una forma u otra para el principio y fin de este trabajo.

A la M en C. Dolores Sarracino, Norma Fuentes, Citlali Romero y Quim. Ivonne Best por su siempre buena disposición para ayudarme en los trámites académicos desde el principio hasta el final.

A todo el personal de la biblioteca por ayudarme en la búsqueda de artículos.

A chava por ayudarme con el programa Matlab.

A mis compañeros y amigos de laboratorio Bertha y Cyntia por formar parte de este proyecto, por esas charlas en el laboratorio llenas de risas, por brindarme siempre un buen consejo, una sonrisa o un abrazo cuando más lo necesitaba. A Natalie, Axel y José por su apoyo en el laboratorio y por ser tan buenos compañeros.

A mis compañeros y amigos de generación Erik, Mariela, Melisa (Los cuatro fantásticos) gracias amigos fue muy divertido estudiar con ustedes, gracias por compartirme sus conocimientos y su amistad. A mi compañeros y amigos del CICESE Luis, Emiliano, Anita y a todos ellos con los que compartí una fiesta, una discusión o alguna clase y formaron parte de esta parte de mi vida.

A mis amigos de Ensenada y de la vida por siempre saber, que están ahí, por brindarme sonrisas, bailes, por estar en esos momentos difíciles que con su ayuda todo se ve de otro color. Los quiero y mucho.

A la familia política por su cariño y apoyo desde la distancia.

A mis tíos, tías, primos, primas, sobrinos, sobrinas, por su cariño a lo largo de mi vida.

A mi madre, padre, abuela, hermana, cuñado gracias por el amor, la alegría y el aprender constante que me genera su convivencia. Por voltear y saber que están ahí siempre.

A mi compañero de vida y amor. Por su apoyo constante, por su sonrisa y sus ojos que me alegran la vida, por sus brazos que me sostienen cuando estoy cansada y por la convivencia día a día. Por ser tan parte de mí y de este proyecto que es tanto mío como suyo. Gracias pajarito.

## CONTENIDO

	<b>Página</b>
<b>RESUMEN ESPAÑOL</b> .....	i
<b>RESUMEN INGLÉS</b> .....	iii
<b>DEDICATORIAS</b> .....	v
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	vi
<b>CONTENIDO</b> .....	viii
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	xiii
<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	xviii
<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>II. ANTECEDENTES</b> .....	4
<b>II.1 Oceanografía del Sistema de la Corriente de California (SCC) y el Golfo de California (GC)</b> .....	4
<b>II.2 Foraminíferos plásticos</b> .....	6
<b>III. JUSTIFICACIÓN</b> .....	9
<b>IV. OBJETIVOS</b> .....	10
<b>IV. HIPÓTESIS</b> .....	11
<b>VI. METODOLOGÍA</b> .....	12
<b>VI.1 Área de estudio</b> .....	12
<b>VI.2 Evaluar el intervalo de la profundidad de calcificación de <i>Golbigerinoides ruber s.s</i>, <i>Globigerina bulloides</i> y <i>Neoglobocadrina dutertrei</i> y estimar su consistencia espacial estacional</b> .....	15
<b>VI.2.1 Obtención de los perfiles estacionales de temperatura (T) y salinidad (S) en las cuatro localidades de estudio</b> .....	15

## CONTENIDO (Continuación)

	<b>Página</b>
VI.2.2 Obtención de las determinaciones isotópicas del oxígeno ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{FP}}$ ) de las tres especies de foraminíferos ( <i>Globigerinoides ruber s.s.</i> , <i>Glogigerina bulloides</i> y <i>Neogloboquadrina dutertrei</i> ) en las cuatro estaciones.....	16
VI.2.3 Intervalo de la profundidad de calcificación en la columna de agua preferente de las tres especies de foraminíferos y su consistencia espacial y estacional entre las cuatro localidades.....	19
VI.3 Elaborar y calibrar un índice a partir de las composiciones isotópicas del oxígeno con información sobre la estratificación de la capa de mezcla.....	21
VI.3.1 Relación entre los valores de $\delta^{18}\text{O}_{\text{C}}$ calculados a partir de los perfiles de temperatura y salinidad con los valores de densidad del agua en las cuatro localidades.....	21
VI.3.2 Selección de los foraminíferos plácticos con información sobre la capa de mezcla en verano y conversión de sus diferencias en las composiciones isotópicas del oxígeno en diferencias de densidad.....	22
VI.4 Validar el índice de estratificación de la capa de mezcla en la región sur del sistema de la Corriente de California utilizando un registro sedimentario de 50 años comparado con una serie de tiempo instrumental.....	22
VI.4.1 Elaboración de una serie de tiempo a partir del índice de estratificación de la capa de mezcla reconstruido a partir de un registro sedimentario de los últimos 50 años en la cuenca de San Lázaro.....	22
VI.4.2 Comparación de la serie de tiempo del índice de la estratificación de la capa de mezcla en la cuenca de San Lázaro con una serie de tiempo instrumental de las anomalías de temperatura en el ecuador capturada por el índice El Niño-Oscilación Austral (ENOA).....	23

## CONTENIDO (Continuación)

	<b>Página</b>
<b>VI.5</b> Reconstruir la variabilidad de la capa de mezcla del sur del sistema de la Corriente de California para los últimos 400 años e interpretar que procesos océano-climáticos están controlando la variabilidad de la capa de mezcla en la región meridional del SCC.....	24
<b>VII.5.1</b> Serie de tiempo del índice de estratificación de la capa de mezcla reconstruido a partir de un registro sedimentario que abarca los últimos 400 años en la cuenca San Lázaro.....	24
<b>VI.5.2</b> Comparación de la reconstrucción obtenida a partir del índice de la estratificación de la capa de mezcla que abarca los últimos 400 años en la cuenca de San Lázaro con una reconstrucción de las anomalías de temperatura en HN obtenida por Mann <i>et al.</i> (2008) a partir de los anillos de los arboles.....	24
<b>VI.5.3</b> Comparación de la reconstrucción obtenida a partir del índice de la estratificación de la capa de mezcla que abarca los últimos 400 años en la cuenca de San Lázaro con una reconstrucción de las anomalías de presión en el ecuador a partir del del Índice de la Oscilación Austral (ISA) reconstruida por Jones y Mann (2004).....	25
<b>VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	26
<b>VII.1</b> Intervalos de la profundidad de calcificación de <i>Golbigerinoides ruber s.s.</i> , <i>Globigerina bulloides</i> y <i>Neoglobocadrina dutertrei</i> y consistencia espacial y estacional entre las cuatro localidades de estudio caracterizadas por diferente amplitud estacional de la temperatura en la capa de mezcla.....	26
<b>VII.1.1</b> Perfiles estacionales de temperatura (T) y salinidad (S) en las cuatro localidades de estudio.....	26

## CONTENIDO (Continuación)

	<b>Página</b>
<b>VII.1.2</b> Determinaciones isotópicas del oxígeno ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{FP}}$ ) de las tres especies de foraminíferos ( <i>Globigerinoides ruber</i> s.s, <i>Glogigerina bulloides</i> y <i>Neogloboquadrina dutertrei</i> ) en las cuatro estaciones.....	29
<b>VII.1.3</b> Intervalo de la profundidad de calcificación en la columna de agua preferente de las tres especies de foraminíferos y su consistencia espacial y estacional entre las cuatro localidades.....	30
<b>VII.2</b> Índice de la estratificación de la capa de mezcla a partir de las composiciones isotópicas del oxígeno en los foraminíferos plácticos.....	37
<b>VI.2.1</b> Relación entre los valores de $\delta^{18}\text{O}_{\text{C}}$ calculados a partir de los perfiles de temperatura y salinidad con los valores de densidad del agua en las cuatro localidades.....	37
<b>VII.2.2</b> Conversión de los valores isotópicos de los foraminíferos plácticos que proveen información sobre la capa de mezcla durante el verano en diferencias de densidad.....	38
<b>VII.3</b> Validación del índice de estratificación de la capa de mezcla utilizando un registro sedimentario de 50 años comparado con una serie de tiempo instrumental.....	43
<b>VII.3.1</b> Construcción de la serie de tiempo a partir del índice de estratificación de la capa de mezcla reconstruido a partir de un registro sedimentario de los últimos 50 años de la cuenca de San Lázaro.....	43

## CONTENIDO (Continuación)

	<b>Página</b>
<b>VII.3.2</b> Comparación de la serie de tiempo del índice de la estratificación de la capa de mezcla en la cuenca de San Lázaro con una serie de tiempo instrumental de las anomalías de temperatura en el ecuador capturada por el índice El Niño-Oscilación Austral (ENOA).....	45
<b>VII.4</b> Reconstruir la variabilidad de la capa de mezcla del sur del sistema de la Corriente de California para los últimos 400 años e interpretar que procesos océano-climáticos están controlando la variabilidad de la capa de mezcla en la región meridional del SCC.....	48
<b>VII.4.1</b> Serie de tiempo del índice de estratificación de la capa de mezcla reconstruido a partir de un registro sedimentario que abarca los últimos 400 años en la cuenca San Lázaro.....	48
<b>VII.4.2</b> Comparación de la reconstrucción obtenida a partir del índice de la estratificación de la capa de mezcla que abarca los últimos 400 años en la cuenca de San Lázaro con una reconstrucción de las anomalías de temperatura en HN obtenida por Mann <i>et al.</i> (2008) a partir de los anillos de los arboles.....	49
<b>VII.4.2</b> Comparación de la reconstrucción obtenida a partir del índice de la estratificación de la capa de mezcla que abarca los últimos 400 años en la cuenca de San Lázaro con una reconstrucción de las anomalías de presión en el ecuador a partir del del Índice de la Oscilación Austral (ISA) reconstruida por Jones y Mann (2004).....	51
<b>VIII. CONCLUSIONES</b> .....	53
<b>LITERATURA CITADA</b> .....	54
<b>APENDICE I</b> .....	59
<b>APENDICE II</b> .....	60

## LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	Mapa de las cuatro localidades de estudio.	14
2	Perfiles de temperatura y salinidad de la columna de agua estacionales de la composición isotópica del oxígeno para la calcita en equilibrio ( $\delta^{18}\text{O}_c$ ) calculada con la ecuación (2). Línea continua roja perfil de invierno; línea de trazos y puntos azul perfil de primavera; línea discontinua malva perfil de otoño, línea discontinua verde perfil de invierno).	16
3	Intervalo de la profundidad de calcificación de <i>G.ruber s.s</i> (rectángulo color malva), <i>G.bulloides</i> (rectángulo color naranja) y <i>N.dutertrei</i> (rectángulo color negro) obtenido a partir de la intersección entre los valores de $\delta^{18}\text{O}_c$ para los perfiles estacionales de temperatura y salinidad de la columna de agua (líneas continua o de trazos) y los valores de $\delta^{18}\text{O}_{\text{Fp}}$ determinados de las tres especies.	20
4	1 – 4 <i>Globigerinoides ruber s.s</i> y 5 – 9 <i>Globigerinoides ruber s.l</i>	21
5	Perfiles estacionales de la composición isotópica del oxígeno en la calcita en equilibrio de temperatura y salinidad de la columna de agua en las cuatro localidades de estudio. Línea continua roja perfil de invierno; línea de trazos y puntos azul perfil de primavera; línea discontinua malva perfil de otoño, línea discontinua verde perfil de invierno).	28
6	Estimación del intervalo de la profundidad de calcificación y estacionalidad de las tres especies de foraminíferos pláncnicos en la cuenca San Lázaro en el sistema de la Corriente de California, <i>Globigerinoides ruber s.s</i> ( <i>G.r s.s</i> rectángulo malva); <i>Neogloboquadrina dutertrei</i> ( <i>N.d</i> rectángulo negro); <i>Globigerina bulloides</i> ( <i>G.b</i> rectángulo naranja). Las líneas representan los valores de $\delta^{19}\text{O}_c$ calculados para cada estación: línea continua roja, invierno; línea discontinua azul, primavera; línea discontinua verde, verano; línea discontinua malva, otoño.	31

## LISTA DE FIGURAS (Continuación)

Figura		Página
7	<p>Estimación del intervalo de la profundidad de calcificación y estacionalidad de las tres especies de foraminíferos pláncnicos en la cuenca El Carmen, Golfo de California. <i>Globigerinoides ruber</i> s.s (<i>G.r</i> s.s rectángulo malva); <i>Neogloboquadrina dutertrei</i> (<i>N.d</i> rectángulo negro); <i>Globigerina bulloides</i> (<i>G.b</i> rectángulo naranja). Las líneas representan los valores de <math>\delta^{18}\text{O}_c</math> calculados para cada estación: línea continua roja, invierno; línea discontinua azul, primavera; línea discontinua verde, verano; línea discontinua malva, otoño.</p>	32
8	<p>Estimación del intervalo de la profundidad de calcificación y estacionalidad de las tres especies de foraminíferos pláncnicos en la cuenca Pescadero, Golfo de California. <i>Globigerinoides ruber</i> s.s (<i>G.r</i> s.s rectángulo malva); <i>Neogloboquadrina dutertrei</i> (<i>N.d</i> rectángulo negro); <i>Globigerina bulloides</i> (<i>G.b</i> rectángulo naranja). Las líneas representan los valores de <math>\delta^{18}\text{O}_c</math> calculados para cada estación: línea continua roja, invierno; línea discontinua azul, primavera; línea discontinua verde, verano; línea discontinua malva, otoño.</p>	33
9	<p>Estimación del intervalo de la profundidad de calcificación y estacionalidad de las tres especies de foraminíferos pláncnicos en la cuenca Bahía de la Paz, Golfo de California. <i>Globigerinoides ruber</i> s.s (<i>G.r</i> s.s rectángulo malva); <i>Neogloboquadrina dutertrei</i> (<i>N.d</i> rectángulo negro); <i>Globigerina bulloides</i> (<i>G.b</i> rectángulo naranja). Las líneas representan los valores de <math>\delta^{19}\text{O}_c</math> calculados para cada estación: línea continua roja, invierno; línea discontinua azul, primavera; línea discontinua verde, verano; línea discontinua malva, otoño.</p>	34
10	<p>Relación de la composición isotópica del oxígeno en la calcita equilibrio (<math>\delta^{18}\text{O}_c</math>) calculada y la densidad del agua.</p>	38
11	<p>Intervalo de la profundidad de calcificación de <i>G.ruber</i> s.s y <i>N.dutertrei</i> en donde las diferencias de su composición isotópica de oxígeno representan dos situaciones diferentes de la capa de mezcla en verano. La línea punteada representa aguas superficiales más cálidas y la línea continua representa unas aguas superficiales más frías.</p>	39

## LISTA DE FIGURAS (Continuación)

Figura		Página
12	Intervalo de la profundidad de calcificación de <i>G.ruber s.s</i> y <i>N.dutertrei</i> en donde las diferencias de sus densidades representan dos situaciones diferentes de la capa de mezcla en verano.	40
13	Diagrama T-S de un perfil en profundidad de los valores de T-S durante <i>El Niño</i> 1997 y un perfil en profundidad durante <i>La Niña</i> 1999. Sobre este diagrama hemos graficado las isopiecnas para ilustrar el efecto del calentamiento/enfriamiento mayor/menor salinidad sobre la estructura de la densidad en la columna de agua. A si también se han sobrepuesto la media del intervalo de profundidad de calcificación de <i>G.ruber s.s</i> (rectángulo rosa) y <i>N.dutertrei</i> (rectángulo negro) y se observa cómo las diferencias de las densidades $\Delta\rho$ son mayores durante un evento de <i>El Niño</i> que durante <i>La Niña</i> .	42
14	Diagrama T-S de un perfil en profundidad de <i>El Niño</i> 1959 en rojo y un perfil en profundidad de <i>La Niña</i> 1952 en azul. En este gráfico hemos sobrepuesto la media del intervalo de profundidad de calcificación de <i>G.ruber s.s</i> (rectángulo rosa) y <i>N.dutertrei</i> (rectángulo negro) y se aprecia cómo las diferencias en las densidades $\Delta\rho$ son mayores durante los eventos de <i>El Niño</i> que durante <i>La Niña</i> .	42
15	Diagrama T-S en el que se muestra un perfil en un evento <i>El Niño</i> y en un evento <i>La Niña</i> en la región de IMECOCAL (Durazo <i>et al.</i> 2002).	43
16	Reconstrucción obtenida de la diferencia en densidad partir de la diferencia en la composición isotópica del oxígeno de <i>G.ruber s.s</i> y <i>N.dutertrei</i> entre la superficie y los 50-60 m de profundidad en la cuenca de San Lázaro en el sur del sistema de la Corriente de California para los últimos 50 años.	44

**LISTA DE FIGURAS (Continuación)**

Figura	Página
17 Comparación entre la reconstrucción de la estratificación de la capa de mezcla para los últimos 50 años a partir de la diferencia de densidad entre <i>G.ruber s.s</i> y <i>N.dutertrei</i> en el sur del sistema de la Corriente de California del núcleo BAP96-6C (línea discontinua azul con puntos, eje de las ordenadas de la derecha) con el índice de las anomalías de temperatura ENOA para los últimos 50 años (línea continua roja, eje de las ordenadas de la izquierda).	47
18 Reconstrucción obtenida a partir de la diferencia en la composición isotópica del oxígeno de la profundidad de calcificación de <i>G.ruber s.s</i> y <i>N.dutertrei</i> transformada a diferencias de densidad (Índice de la capa de mezcla) en la cuenca de San Lázaro en el sur del sistema de la Corriente de California para los últimos 400 años.	49
19 Reconstrucción de la estratificación de la capa de mezcla para los últimos 400 años a partir de la diferencia de densidad entre <i>G.ruber s.s</i> y <i>N.dutertrei</i> en el sur del sistema de la Corriente de California (línea discontinua azul, eje de las ordenadas de la derecha). Reconstrucción de las anomalías del Hemisferio Norte para los últimos 400 años (Mann 1998). (Línea continua amarilla, eje de las ordenadas de la izquierda).	51
20 Reconstrucción de la estratificación de la columna de agua para los últimos 400 años a partir de la diferencia de densidad entre <i>G.ruber s.s</i> y <i>N.dutertrei</i> en el sur del sistema de la Corriente de California (línea discontinua azul, eje de ordenadas de la derecha) Reconstrucción de las anomalías de presión (SOI) en el Ecuador (Jones y Mann, 2004). (Línea continua naranja, eje de ordenadas de la izquierda).	52

**LISTA DE FIGURAS (Continuación)**

Figura	Página
21 Intervalos de la profundidad de calcificación de <i>Globigerinoides ruber s.l</i> (cuadro azul) y <i>Globigerinoides ruber s.s</i> (cuadro malva). Las líneas representan los valores de $\delta^{19}\text{O}_c$ calculado de la calcita en equilibrio para cada estación: línea continua roja, invierno; línea discontinua azul, primavera; línea discontinua verde, verano; línea discontinua malva, otoño. El eje de las ordenadas representa la profundidad (m) y el eje de las abscisas representa los valores de $\delta^{18}\text{O}_c$ calculado.	58

## LISTA DE TABLAS

Tabla		Página
I	Temperatura superficial promedio del mar de las cuatro localidades durante las cuatro estaciones del año calculado a partir de los datos de temperatura obtenidos de la base de datos WODV.	29
II	Número de determinaciones isotópicas ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{FP}}$ ) de <i>G.ruber s.s.</i> , <i>G.bulloides</i> y <i>N.dutertrei</i> analizada para cada localidad.	30
III	Intervalos de la profundidad de calcificación y estacionalidad estimados para cada especie de foraminífero pláctico en las cuatro localidades estudiadas.	35
IV	Composición isotópica de <i>Globigerinoides ruber s.l</i> y <i>Globigerinoides ruber s.s.</i>	60

## I. INTRODUCCIÓN

Con el objetivo de reconstruir la variabilidad climática en el sur del Sistema de la Corriente de California (SCC) elaboramos un índice de la estratificación de la capa de mezcla a partir de la composición isotópica del oxígeno ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{FP}}$ ) de foraminíferos plácticos selectos. La primera meta de nuestro estudio consiste en mostrar la consistencia del intervalo de profundidad de calcificación de estos organismos, periodo durante el cual forman su caparazón calcítico y adquieren su composición isotópica. El diseño de esta primera parte es el de observar si en localidades con diferentes amplitudes estacionales en la temperatura de la capa de mezcla, los foraminíferos plácticos construyen sus caparazones calcíticos a profundidades similares durante las mismas estaciones del año.

El estudio pionero de Urey (1947) sobre la composición isotópica del oxígeno en los carbonatos, que luego fue aplicado a los foraminíferos plácticos por Emiliani (1954) abrieron la oportunidad para reconstruir la temperatura (T) de los océanos y su variabilidad a lo largo del tiempo. Sin embargo, casi desde el comienzo se dieron cuenta de las limitaciones de este método para reconstruir la historia de la temperatura de los océanos: la composición isotópica del oxígeno en la calcita también integra información sobre la salinidad y consecuentemente se tiene una ecuación con dos incógnitas que no se pueden resolver sin información complementaria. A pesar de esto, desde un principio Emiliani (1954) mostró la utilidad de este método para caracterizar a qué profundidad calcifican los foraminíferos plácticos en la columna de agua. El problema es que al variar la relación entre la salinidad y la composición isotópica del oxígeno en las distintas regiones del océano, estas reconstrucciones tienen una extensión espacial y temporal limitadas.

En este estudio que combina la región sur del sistema de la Corriente de California y el Golfo de California capturamos los límites de las amplitudes estacionales de la salinidad y temperatura de la región noroeste del Pacífico transicional. En esta región, durante el verano las aguas superficiales tienen características tropicales, cálidas y salinas mientras

durante el invierno-primavera las aguas superficiales procedentes del Pacífico norte son más frías y menos salinas.

La finalidad de este experimento es la de observar si bajo estacionalidades diferentes los foraminíferos plácticos calcifican en similares intervalos de profundidad y estación del año. Esta condición es necesaria para establecer la fidelidad de estos organismos con estas variables.

El intervalo de la profundidad de calcificación de cada especie se obtuvo considerando la intersección entre la composición isotópica del oxígeno en la calcita en equilibrio ( $\delta^{18}\text{O}_c$ ) calculada con datos de salinidad y temperatura de las localidades de estudio y la composición isotópica del oxígeno ( $\delta^{18}\text{O}_{FP}$ ) determinada para cada especie de foraminífero pláctico.

En la segunda parte, se relacionan las composiciones isotópicas del oxígeno en la calcita en equilibrio en la columna de agua con la densidad del agua. Esta relación se basó en el hecho de que la composición isotópica de oxígeno en la calcita calculada ( $\delta^{18}\text{O}_c$ ) y la densidad del agua aumentan como resultado de un aumento en la salinidad y una disminución en la temperatura.

Como mencionábamos previamente la relación de la composición de la calcita en equilibrio y la salinidad es compleja. Los valores de  $\delta^{18}\text{O}_c$  reflejan la composición isotópica del agua ( $\delta^{18}\text{O}_w$ ) en la que los foraminíferos plácticos precipitaron sus caparazones. A su vez, la composición isotópica del agua ( $\delta^{18}\text{O}_w$ ) refleja fundamentalmente los patrones de evaporación y precipitación así como el de los flujos de agua dulce entre océanos y continentes y sus casquetes polares de una manera similar a la salinidad. Sin embargo esta relación varía entre las diferentes regiones superficiales del océano (Craig y Gordon, 1965; GEOSECS, 1982) y temporalmente dependiendo de la cantidad de hielo que se acumule en los casquetes polares. Nuestro estudio abarca los últimos 400 años, periodo para el que sabemos que estas variaciones de los casquetes polares son mínimas por lo que podemos suponer que esta fuente de variabilidad es prácticamente nula. También suponemos que la relación entre los procesos de evaporación y precipitación no ha cambiado la relación entre la composición isotópica del agua y la salinidad en la región sur del Sistema de la Corriente de California durante el período de estudio.

Observando la consistencia en las preferencias de la profundidad de calcificación y estacionalidad de dos de los foraminíferos plácticos analizados encontramos que uno de ellos calcifica en la superficie y solo durante el verano y el otro calcifica preferentemente en profundidad durante la misma estación. A partir de estas observaciones y de la relación que hemos establecido entre la composición isotópica del oxígeno y la densidad en la columna de agua podemos convertir las diferencias entre las composiciones isotópicas del oxígeno de ambas especies en diferencias de la densidad entre la capa superficial y la termoclina en la capa de mezcla.

Por otro lado exploramos cuáles son las fuentes de variabilidad en la región sur del Sistema de la Corriente de California y encontramos que el fenómeno oceanográfico de origen ecuatorial el ENOA es uno de los procesos que pueden aumentar o disminuir el gradiente de densidad entre la superficie y la termoclina. De forma que años de *El Niño* se caracterizan por una profundización de la capa de mezcla y un mayor gradiente de densidad en contraste con años de *La Niña* que se caracterizan por presentar una termoclina más somera y un menor gradiente de densidad.

En la última parte del trabajo validamos el índice que hemos establecido para reconstruir las diferencias de densidad a partir de las diferencias de la composición isotópica de oxígeno de los foraminíferos plácticos. Esta validación la basamos en una comparación entre una reconstrucción a partir de los sedimentos laminados de Cuenca San Lázaro en el sur del SCC que abarcan las últimas 5 décadas y el índice instrumental de *El Niño y la Oscilación Austral* (ENOA).

## II. ANTECEDENTES

### II.1 Oceanografía del Sistema de la Corriente de California (SCC) y el Golfo de California (GC)

**El Sistema de la Corriente de California** forma parte del margen oriental del giro del Pacífico subtropical (Hickey, 1979). Presenta una variabilidad estacional controlada por la radiación solar y a la acción de los vientos la cual está asociada a los centros de baja presión de las Aleutianas en el invierno y el centro de alta presión del Pacífico norte durante el verano. Esta estacionalidad de las celdas de presión junto con su contraparte que se encuentra sobre el continente Norteamericano genera una marcada estacionalidad en la dirección e intensidad de los vientos. Durante el verano la celda de alta presión sobre el subtrópico Pacífico norte y la celda de baja presión sobre el continente favorecen la intensificación de los vientos del noroeste a lo largo de la costa, proceso que controla el flujo del SCC hacia el sur y los procesos de surgencias costeras y del rizo del viento en mar abierto (Mackas, 2005; Páres *et al.* 1997). Estos procesos de surgencias producen una mezcla con aguas subsuperficiales que disminuyen las temperaturas y concentraciones de oxígeno al tiempo que aumentan la salinidad y la concentración de nutrientes en la superficie presentando una capa de mezcla más profunda (Lynn y Simpson, 1987).

Otros procesos de escalas interanual e interdecadal, como ENOA y la Oscilación interdecadal del Pacífico (ODP), influyen a su vez sobre la variabilidad estacional en la intensidad de las corrientes y en el desplazamiento latitudinal de las masas de agua en el SCC (Esparza, 2007).

El ENOA es un fenómeno del sistema océano-atmósfera con origen en el Pacífico Ecuatorial, cuyo comportamiento se captura por un índice derivado a partir de las diferencias de presión atmosféricas entre Tahití y Darwin (NE Australia). Este fenómeno climático de escala interanual tiene un gran efecto sobre la hidrografía, circulación, biogeoquímica y en la estructura de las comunidades en la escala de todo el océano.

Durante el último medio siglo, los efectos del ENSO dentro del SCC muestran las siguientes características: (Mackas, 2005). (i) Incremento en la temperatura y salinidad de las aguas del SCC, (ii) mayor estratificación de la capa de mezcla, (iii) menor mezcla vertical, (iv) reducción en transporte de agua subártica hacia el Ecuador y un aumento del agua ecuatorial hacia los polos.

**El Golfo de California** es un mar marginal localizado al noroeste de México. Al este colinda con los estados de Sonora y Sinaloa y al oeste con la Península de Baja California (Castro *et al.* 2000). Tiene 1400 km de largo y 150 km de ancho (Roden, 1958).

La mayor parte del agua cerca y dentro del Golfo de California es la misma que la del Pacífico Tropical, aunque está ligeramente modificada en la superficie por la evaporación y por la mezcla con las aguas de la Corriente de California que logran entrar por la parte sur del Golfo de California (Roden, 1958).

La circulación del Golfo de California presenta variabilidad temporal controlada en gran medida por el Océano Pacífico, el sistema de vientos y el flujo de calor de la superficie. (Lavin *et al.* 1997). El viento es uno de los más importantes controles sobre la circulación en el Golfo de California. Durante el invierno el viento tiene una dirección dominante hacia el sureste a lo largo del golfo lo que genera surgencias costeras del lado del continente. Su procedencia de la masa continental norteamericana le da las características frías y secas. Durante el verano el viento presenta características de humedad y calor debido a que proviene del sur de la zona oceánica tropical. Las surgencias del lado de la península son mucho menos intensas que las que se observan en invierno debido a que los vientos son más débiles, a que la plataforma continental es muy estrecha y a que el agua superficial tropical tiene su máxima intrusión en esta época del año cuando se observan una mayor estratificación (Lavin *et al.* 1997; Lavin y Marinone, 2003).

Estacionalmente el Golfo de California se caracteriza por presentar una capa de mezcla más profunda durante invierno y primavera debido a la intensificación de los vientos y a una menor temperatura como consecuencia de una disminución en la radiación solar. En verano, los vientos son menos intensos y la radiación solar aumenta, lo que provoca un

adelgazamiento de la capa de mezcla y una mayor estratificación (Lavin *et al.* 1997). En verano la profundidad de capa de varía entre los 25 a 50 m, mientras que en invierno la capa de mezcla puede alcanzar entre los 70 a 90 m de profundidad (Valdez-Holguin, 1995).

## II.2 Foraminíferos plácticos

Se han publicado numerosos estudios basados en las determinaciones de las abundancias relativas de los isótopos estables del oxígeno en el carbonato de calcio de los caparzones de los foraminíferos plácticos debido a que son unas de las herramientas más utilizadas para reconstruir la historia del océano. Su buena preservación en los sedimentos de todos los océanos y sus patrones de distribución geográfica y estacionalidad, así como una preferencia en la profundidad en la columna de agua (Berger, 1981), los hacen enormemente útiles en el ámbito de la paleoceanografía y paleoclimatología como registro de la variaciones físicas, químicas y biológicas de las aguas en el océano (Wefer y Berger, 1991).

Revelo y Fairbanks (1992) obtuvieron la profundidad de calcificación de doce especies de foraminíferos plácticos en tres regiones del Atlántico: suroeste del Atlántico tropical, sureste del Atlántico tropical y noroeste del Atlántico tropical, con amplitud diferente estacional. A partir de la ecuación Epstein (1953) calcularon la composición isotópica del oxígeno en equilibrio ( $\delta^{18}\text{O}_c$ ) para cada localidad estacionalmente y en profundidad y la relacionaron con la composición isotópica del oxígeno obtenida directamente de cada especie de foraminífero pláctico ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{FP}}$ ) colectados en núcleos de sedimento en cada región, derivando de esta forma el intervalo de profundidad de calcificación estacional para cada especie. También compararon la profundidad de calcificación estimada para cada especie con la composición isotópica de oxígeno obtenida de las mismas especies colectadas en redes de plácton situadas a diferentes profundidades de la columna de agua y durante todo el año. Al comparar los valores de  $\delta^{18}\text{O}_c$  del registro sedimentario con los valores de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{FP}}$  de los foraminíferos plácticos obtenidos de las trampas de plácton, observaron que los foraminíferos plácticos presentaban preferencias tanto en la profundidad de la columna de agua como diferencias en su abundancia estacional. De manera similar Sautter y Thunell (1991) obtuvieron la profundidad de calcificación de

cuatro especies de foraminíferos en Southern California Bight (SCB) influenciada estacionalmente por periodos de surgencias. Calcularon los valores de  $\delta^{18}\text{O}_c$  a partir de los datos de temperatura y salinidad del área de estudio para elaborar perfiles de temperatura y salinidad en profundidad y estacionales. Determinaron los valores de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{FP}}$  de las tres especies de foraminíferos plácticos obtenidos de los registros sedimentarios y colectados en redes de plácton a finales de abril y principios de junio durante el periodo de surgencias. Observaron que a partir de la composición isotópica del oxígeno de las tres especies de foraminíferos, podían deducir su preferencia en la profundidad en la columna de agua durante periodos de surgencias, diferenciando la capa de mezcla, la termoclina y por debajo de la termoclina. Concluyeron que la única especie preservada en los sedimentos podría ser utilizada como indicadora de periodos de surgencias es *Globigerina bulloides* debido a que su máxima producción se observa durante estos periodos, mientras que *Neogloboquadrina dutertrei* es indicadora de la finalización del periodo de surgencias.

Para la elaboración y las finalidades de este estudio se utilizaron tres especies de foraminíferos plácticos: (i) *Globigerinoides ruber* especie espinosa que presenta algas simbiontes asociados a sus espinas, se caracteriza principalmente por encontrarse entre 0-50 m en la capa de mezcla, generalmente en aguas oligotróficas y cálidas. Por su hábitat superficial, esta especie se ha utilizado para la reconstrucción de la temperatura superficial de los océanos (Be *et al.* 1985; Kemle y Oberhansli, 1999; Ravelo y Fairbanks, 1992; Witt *et al.* 2010). (ii) *Neogloboquadrina dutertrei* se caracteriza por encontrarse en profundidad, generalmente asociada con el máximo de clorofila profundo. Los valores de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{FP}}$  de esta especie se han utilizado para reconstruir las condiciones hidrográficas de la termoclina estacional en la columna de agua (Curry *et al.* 1983; Fairbanks *et al.* 1980; Kemle y Oberhansli, 1999; Kroon y Darling, 1995; Pak y Kennett, 2002; Sautter y Thunell 1991).

(iii) *Globigerina bulloides* una especie espinosa y sin la presencia de simbiontes, se caracteriza por encontrarse en aguas relativamente más frías y de alta productividad biológica asociada a pulsos de enriquecimiento de nutrientes por bombeo de Ekman. Los valores de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{FP}}$  de esta especie han sido utilizados en mayor medida para reconstruir y trazar masas superficiales ricas en nutrientes, así como zonas de surgencias (Spero y Lea

1990; Kroon y Darling, 1995; Pak y Kennet 2002; Curry *et al.* 1983; Sautter y Thunell 1991, Ravelo y Fairbanks, 1992).

### **III. JUSTIFICACIÓN**

Elaborar un índice de la estratificación de la capa de mezcla para reconstruir la variabilidad de la capa de mezcla del sur del sistema de la Corriente de California nos permitiría, por un lado, conocer cuál es la variabilidad natural del SCC, y por otra parte, evaluar el impacto que el cambio climático pudiese tener sobre esta variabilidad. La reconstrucción de las características de la capa de mezcla nos proporcionará la posibilidad de investigar sobre los forzamientos externos y procesos de retroalimentación internos que la controlan y modulan en el SCC durante un largo período de tiempo a escalas interdecadales a centenarias.

#### IV. OBJETIVOS

- A partir de la composición isotópica del oxígeno en los caparazones calcínicos de los foraminíferos plácticos: *Golbigerinoides ruber s.s.*, *Globigerina bulloides* y *Neoglobocuardina dutertrei* estimar el intervalo de su profundidad de calcificación en la columna de agua en cuatro localidades a lo largo de un gradiente de condiciones oceanográficas estacionales; tres de ellas ubicadas en el Golfo de California y una de ellas ubicada en el sur del sistema de la Corriente de California.
- Evaluar la consistencia espacial y estacional del intervalo de la profundidad de calcificación de *Golbigerinoides ruber s.s.*, *Globigerina bulloides* y *Neoglobocuardina* comparando cuatro localidades con diferentes amplitudes estacionales en la temperatura de la capa de mezcla.
- Elaborar y calibrar un índice de la estratificación de la columna de agua a partir de las composiciones isotópicas del oxígeno en los foraminíferos plácticos con información sobre la estratificación de la capa de mezcla.
- Validar el índice de estratificación de la capa de mezcla como proxy para reconstruir la variabilidad de capa de mezcla durante el verano en la región sur del sistema de la Corriente de California, utilizando un registro sedimentario de 50 años comparado con una serie de tiempo instrumental.
- Reconstruir la variabilidad de la capa de mezcla del sur del sistema de la Corriente de California para los últimos 400 años basado en un registro sedimentario de la cuenca San Lázaro e inferir qué procesos océano-climáticos están controlando la variabilidad de la capa de mezcla en la región meridional del SCC.

## **V. HIPÓTESIS**

La composición isotópica del oxígeno de los caparazones de especies selectas de foraminíferos pláncnicos captura información sobre la estratificación estacional de la capa de mezcla en la región meridional del sistema de la Corriente de California.

## VI. METODOLOGÍA

### VI.1 Área de estudio

#### Cuenca de San Lázaro

La cuenca de San Lázaro es una cuenca semicerrada que se localiza en el sureste del margen continental de Baja California ( $25^{\circ} 10'N$  y  $112^{\circ} 24'W$ ) (Figura 1). La morfología del fondo marino está modelada por la tectónica del margen Pacífico de la Península de Baja California que restringe la entrada de aguas subsuperficiales por un umbral con una profundidad de 350 m, lo que limita la ventilación de esta cuenca entre la profundidad del umbral y el fondo de 550 m. Por otro lado, las aguas superficiales en esta cuenca se caracterizan por los altos niveles de producción primaria asociado a procesos de surgencias e inyección de nutrientes a la zona fótica, lo que favorece una alta exportación de materia orgánica hacia el fondo. Los altos niveles de carbono orgánico exportados al sedimento, junto con las bajas tasas de ventilación de las aguas del fondo, provocan condiciones subóxicas con valores cercanos o menores a  $0.2 \text{ ml L}^{-1}$  en el fondo de la cuenca (Rabiela *et al.* SaLa11. 2011., Hernández *et al.* 2003). Esto inhibe la colonización de macrofauna y meiofauna y por ende los procesos de bioturbación lo que favorece la buena preservación de los sedimentos laminados que se acumulan en el fondo. Estos sedimentos están constituidos por materiales de origen biogénico, que incluyen el carbono orgánico, carbonatos (fundamentalmente compuestos por cocolitofóridos y en menor medida foraminíferos), ópalo biogénico (fundamentalmente compuesto por diatomeas y en menor medida radiolarios, y silicoflagelados), así como por sedimentos de origen litogénico (Esparza-Alvarez *et al.* 2007; Hernández *et al.* 2003; Martínez-Lopez, 2004). El ciclo estacional de la columna de agua está definido por temperaturas más frías durante primavera y comienzos del verano ( $17.1^{\circ}C$  y  $21.6^{\circ}C$ ), y las más cálidas durante finales del verano a otoño ( $23.7^{\circ}C$  y  $28.6^{\circ}C$ ). (Esparza-Alvarez *et al.* 2007).

La cuenca de San Lázaro se encuentra en la zona de convergencia de las masas de agua subártica y las masas de agua ecuatorial, donde las aguas relativamente más frías y frescas provenientes del norte fluyen hacia el ecuador y se mezclan con aguas tropicales y subtropicales más cálidas y saladas en el sur del SCC (Durazo y Baumgartner, 2002). Las

variaciones océano-climáticas como el ENSO, el PDO y el NPGO influyen en las variaciones de ambas masas de agua ocasionando fluctuaciones en las características físicas de temperatura y salinidad, cambios en la termoclina estacional, así como cambios en la flora y fauna. Por lo que la localización de la cuenca de San Lázaro en el sur del SCC le confiere su propiedad como un sensible indicador de las variaciones latitudinales de esta frontera dinámica como respuesta a los fenómenos interanuales e interdecadales.

### **Cuenca Bahía de la Paz**

La cuenca Bahía de la Paz es una cuenca costera con una profundidad de 890 m, se localiza al sureste del Golfo de California ( $24^{\circ}38'N$  y  $110^{\circ}04'W$ ) (Figura.1). Está bañada por aguas superficiales ecuatoriales con una alta salinidad relativa debido a procesos de evaporación. La circulación superficial dentro de la cuenca está influenciada por los vientos del norte durante invierno-primavera, los cuales generan un giro ciclónico favoreciendo una alta productividad primaria, así como un enfriamiento de las aguas superficiales hasta alcanzar los mínimos anuales ( $21^{\circ}C - 24^{\circ}C$ ). Las máximas temperaturas superficiales se alcanzan durante el verano-otoño ( $27^{\circ}C - 31^{\circ}C$ ) (López *et al.* 200., Bernal, 2001).

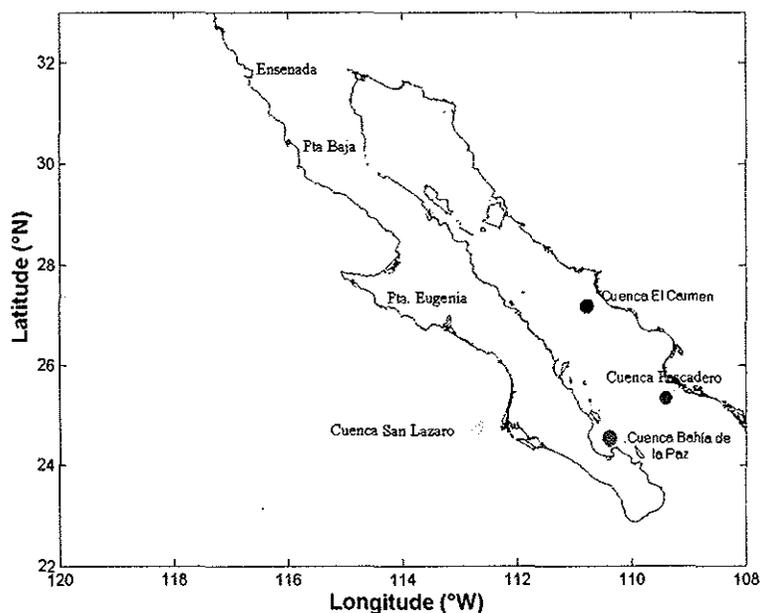
### **Cuenca Pescadero**

Cuenca Pescadero se localiza en la boca del Golfo de California ( $24^{\circ}06'N$  y  $108^{\circ}13'W$ ) (Figura 1) y presenta una profundidad máxima de 3653 m. Es una cuenca estrecha y sinuosa y presenta escarpes y montañas en sus laderas. La velocidad de sedimentación es de aproximadamente 0.5 mm/a. Por otro lado, parte del talud de la cuenca, 400-600 m se caracteriza por su baja concentración de oxígeno cercana a la suboxia ( $0.2 \text{ ml L}^{-1}$ ) por lo que existe muy poca bioturbación ayudando a la buena preservación de los sedimentos laminados. La temperatura superficial del agua de mar es de  $21^{\circ} C$  durante el invierno  $24^{\circ} C$  durante la primavera,  $30^{\circ} C$  en verano y  $27^{\circ} C$  en otoño (Flores, 2009).

### **Cuenca El Carmen**

Cuenca del Carmen se localiza en ( $26^{\circ} 16.9 N$  y  $110^{\circ} W$ ) (Figura 1). Presenta una profundidad máxima de 2779 m, se localiza en el centro del Golfo de California. La cuenca

El Carmen presenta el máximo rango anual de las temperaturas superficiales de todas las localidades estudiadas (~18-30 °C). Durante el periodo de los vientos fuertes provenientes del norte la temperatura superficial del mar es baja y la concentración de los pigmentos es alta. En contraste, la producción primaria es baja cuando los vientos son débiles y provienen del sur. Así mismo, se caracteriza por presentar una gran fertilidad debido a la presencia de surgencias que propician una alta productividad orgánica durante una gran parte del año. Es una cuenca con muy bajo contenido de oxígeno a profundidades intermedias debido a la entrada del Agua Intermedia del Pacifico. Dentro de esta profundidad existe muy poca bioturbación lo que ayuda a la buena preservación de los sedimentos laminados (Thunell, 1998).



**Figura 1. Mapa de las cuatro localidades de estudio.**

**VI.2** Evaluar el intervalo de la profundidad de calcificación de *Golbigerinoides ruber s.s.*, *Globigerina bulloides* y *Neoglobocadrina dutertrei* y estimar su consistencia espacial y estacional.

VI.2.1 Obtención de los perfiles estacionales de temperatura (T) y salinidad (S) en las cuatro localidades de estudio

Se elaboraron perfiles de temperatura (T) y salinidad (S) en profundidad y para las cuatro estaciones del año: primavera que abarcan los meses de abril, mayo y junio, verano que abarcan los meses de julio, agosto y septiembre, otoño que abarcan los meses de octubre noviembre y diciembre e invierno que abarcan los meses de enero, febrero y marzo en las cuatro localidades. Para su elaboración se obtuvieron datos de T y S de la base de datos World Ocean Data View (WODV) desde 1950 a 1980 y se calculo la media para los 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70,80, 90, 100 y 150 m de profundidad, sin embargo casi en todos los casos hubo varios años para los que no había información. En promedio se utilizaron entre 10 y 20 valores para obtener la media de T y S para todas las estaciones del año en las cuatro localidades.

Los datos de salinidad se convirtieron a valores de  $\delta^{18}\text{O}_w$  por medio de la relación obtenida de la base de datos GEOSECS del Pacífico (1982) y los promedios de salinidad estimados en este estudio:

$$\delta^{18}\text{O}_w = 17.323 + 0.50441 * \text{Salinidad} \quad (1)$$

Los promedios de temperatura y los valores de  $\delta^{18}\text{O}_w$  fueron sustituidos en la ecuación propuesta por Bemis *et al.* (1998), partir de la ecuación general para la temperatura (T) de la que se despeja la composición isotópica del oxígeno en la calcita en equilibrio ( $\delta^{18}\text{O}_c$ ) en función de una temperatura T y una composición isotópica de oxígeno del agua ( $\delta^{18}\text{O}_w$ ), de la que sustraemos 0.27 ‰ para convertirla a valores PDB (Hut, 1987).

$$\delta^{18}\text{O}_c = (16.1 + (4.8 * (\delta^{18}\text{O}_w - 0.27)) - T) / 4.8 \quad (2)$$

Con esta ecuación derivamos la composición isotópica del oxígeno en la calcita en equilibrio ( $\delta^{18}\text{O}_c$ ) para cada profundidad hasta los 150 m de la columna de agua y para cada estación del año en las cuatro localidades, representados en la figura 1 para cada localidad. En esta figura el eje de las ordenadas representa la profundidad de la columna de agua, el eje de las abscisas representa los valores de  $\delta^{18}\text{O}_c$  calculados a partir de la ecuación (2) y las líneas de colores continuas y discontinuas representan, los perfiles estacionales de la composición isotópica del oxígeno en la calcita en equilibrio en el agua ( $\delta^{18}\text{O}_c$ ).

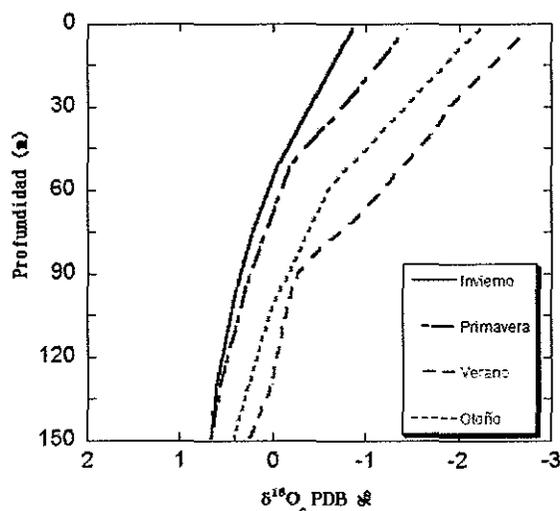


Figura 2. Perfiles de temperatura y salinidad de la columna de agua estacionales de la composición isotópica del oxígeno para la calcita en equilibrio ( $\delta^{18}\text{O}_c$ ) calculada con la ecuación (2). Línea continua roja perfil de invierno; línea de trazos y puntos azul perfil de primavera; línea discontinua malva perfil de otoño, línea discontinua verde perfil de invierno).

VI.2.2 Obtención de las determinaciones isotópicas del oxígeno ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{FP}}$ ) de las tres especies de foraminíferos (*Globigerinoides ruber s.s.*, *Glogigerina bulloides* y *Neogloboquadrina dutertrei*) en las cuatro localidades

Se colectaron núcleos de sedimento durante varias campañas oceanográficas realizadas en la cuenca Pescadero, cuenca La Paz y cuenca El Carmen, localizadas en el Golfo de

California y cuenca San Lázaro localizada en el sistema de la Corriente de California, a bordo de los buques oceanográficos *BO/Francisco de Ulloa* y *BO/El Puma*.

Los núcleos fueron cortados en losas de 2 cm a lo largo del eje de la profundidad, posteriormente se elaboraron plantillas para su corte en láminas entre 2-3 mm perpendicular al eje de la profundidad. Cada una de estas láminas integra registros entre 1-10 años de duración dependiendo de su velocidad de sedimentación por lo que se utilizaron distinto número total de láminas para abarcar los últimos 100 años en todas las localidades de muestreo. Todos los núcleos de sedimento fueron datados radiométricamente a partir del exceso de  $^{210}\text{Pb}$  y  $^{137}\text{Cs}$  y la tasa de sedimentación en todos los casos fue de 0.5 mm/a. Se utilizó el exceso de  $^{210}\text{Pb}$  aportado de la columna de agua con respecto al  $^{210}\text{Pb}$  que es generado por la desintegración del  $^{226}\text{Ra}$  en el sedimento para calcular la tasa de sedimentación de cada núcleo lo que nos permite calcular la cronología para los últimos 100 años para cada uno de los núcleos. El radioisótopo  $^{137}\text{Cs}$  se produjo de una forma importante por las pruebas termonucleares en la atmósfera durante las décadas de los años 50-60 del pasado siglo, tiene una relativa corta vida en la atmósfera y se transporta junto con el material particulado hasta el fondo del océano; su presencia en el sedimento nos marca la fecha en que comenzaron dichas pruebas, lo que permite corroborar cronológicamente este período de tiempo en los núcleos.

A las muestras se les añadió una solución de Calgon (hexametáfosfato de sodio) y se colocaron en un agitador mecánico durante 12 h para favorecer la disgregación del sedimento. Posteriormente se lavaron con un tamiz de  $64\ \mu\text{m}$  y se las volvió a añadir una solución al 3% de peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) durante 3 minutos en un baño ultrasónico para oxidar la materia orgánica y liberar las partículas de la matriz arcillosa adherida. Se volvieron a lavar con agua corriente en un tamiz con luz de malla de  $64\ \mu\text{m}$ . Las muestras resultantes libres de limos, arcillas y materia orgánica una vez secas fueron tamizadas en distintas fracciones. La fracción  $>250\ \mu\text{m}$  se utilizó para la recolección de los foraminíferos plácticos.

De cada una de las 200 muestras se obtuvieron varias determinaciones isotópicas de cada una de las especies de foraminíferos plácticos dependiendo del número de organismos

encontrados. Para obtener una determinación isotópica fiable se necesitan 8 especímenes de *Neobloquadrina dutertrei*, 12 de *Globigerina bulloides* y 14 de *Globigerinoides ruber s.s.*, aunque no en todas las muestras se obtuvieron este número de organismos debido a su variable producción en la zona superficial del océano.. Este número óptimo de especímenes de cada especie necesario fue estimado tras numerosas pruebas en el laboratorio para tener un peso mínimo de carbonatos  $>130\mu\text{g}$  con el fin de obtener una determinación fiable. Los especímenes analizados se colectaron entre los tamaños de 250 a 350  $\mu\text{m}$ . Se introdujeron en tubos Exetainers™ se secaron en un horno a 110°C al menos por una noche previo a las determinaciones isotópicas. Estos Exetainers™ se evacuaron posteriormente con Helio ultrapuro para eliminar la contaminación de CO<sub>2</sub> atmosférico y vapor de agua que son potenciales contaminantes de las determinaciones isotópicas. Se les inyectó ácido fosfórico al 99% para provocar la disolución de la calcita y producir CO<sub>2</sub>. El gas resultante se acarreo por capilares hasta la fuente del espectrómetro de masas mediante un flujo de Helio ultrapuro. Al llegar a la fuente se aceleran los iones de CO<sub>2</sub> lo que fuerza su salida por un tubo de vuelo que al atravesar un campo magnético conocido y fijo separa los iones en función de su relación masa-carga. Su llegada a los colectores de iones de diferentes masas se mide eléctricamente con cambios en sus voltajes. Estos voltajes se transforman en número de impactos de iones de los que por comparación con un gas de referencia se derivan las composiciones isotópicas. La composición isotópica de nuestro interés es la del oxígeno, el cual se reporta en unidades  $\delta\%$ . Los valores de  $\delta$  se calculan con base en la medición de la abundancia relativa del isótopo pesado al ligero ( $R = \text{O}^{18}/\text{O}^{16}$ ) en una muestra con respecto a un estándar universal que en el caso de los carbonatos es PDB:

$$\delta (\%) = (R_{\text{muestra}}/R_{\text{estándar}} - 1) \times 1000$$

Las mediciones isotópicas se calibraron diariamente con un patrón internacional NBS-19 y otros patrones internos del laboratorio LIE-4 y calcita sintética Merck, cuyas desviaciones medias fueron de  $\pm 0.085\%$  para el  $\delta^{18}\text{O}$  y de  $\pm 0.04\%$  para el  $\delta^{13}\text{C}$  durante el período de las determinaciones (noviembre 2010 a marzo 2011).

VI.2.3 Obtención del intervalo de la profundidad de calcificación en la columna de agua preferente de las tres especies de foraminíferos, y estimación de la consistencia espacial y estacional entre las cuatro localidades

Las determinaciones isotópicas del oxígeno ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{FP}}$ ) determinadas para cada especie, se relacionaron con los valores de  $\delta^{18}\text{O}_c$  calculados a partir de la de los datos T y S en profundidad obtenidos del WODW con los que se obtuvieron los perfiles estacionales para cada localidad.

El método que se utilizó consiste en identificar la intersección entre los valores de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{FP}}$  medidos de los caparazones de los foraminíferos plácticos con los perfiles isotópicos calculados ( $\delta^{18}\text{O}_c$ ) a partir de los datos del WODV. Los valores de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{FP}}$  obtenidos de los foraminíferos se representan con un rectángulo, en donde el ancho del rectángulo representa el intervalo de valores de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{FP}}$  determinados en el espectrómetro de masas para cada especie en cada una de las localidades y la altura del rectángulo es una estimación de la profundidad a partir de la intersección del intervalo de los valores de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{FP}}$  medidos con los valores de  $\delta^{18}\text{O}_c$  calculados, como se muestra en la figura 3.

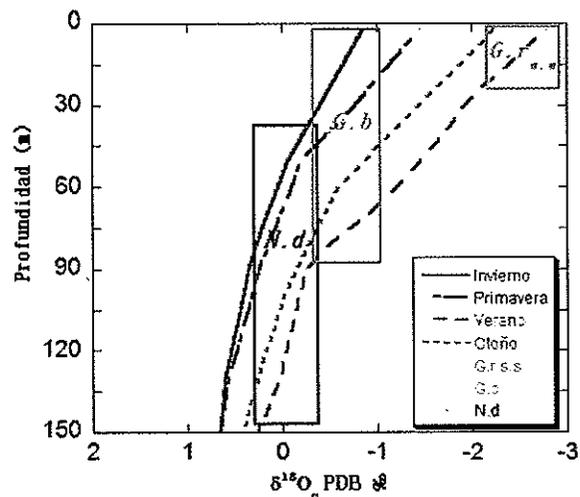


Figura 3. Intervalo de la profundidad de calcificación de *G.ruber s.s* (rectángulo color malva), *G.bulloides* (rectángulo color naranja) y *N.dutertrei* (rectángulo color negro) obtenido a partir de la intersección entre los valores de  $\delta^{18}\text{O}_c$  para los perfiles estacionales de temperatura y salinidad de la columna de agua (líneas continua o de trazos) y los valores de  $\delta^{18}\text{O}_{FP}$  determinados de las tres especies.

Durante el proceso metodológico para la identificación de la especie de foraminíferos plácticos se identificaron dos morfotipos de la especie *Globigerinoides ruber*: *Globigerinoides ruber s.s* y *Globigerinoides ruber s.l* (Figura 4). Estos dos morfotipos presentan composiciones isotópicas del oxígeno diferentes, de forma que el morfotipo *Globigerinoides ruber s.l* está enriquecido con el isotopo más pesado y el morfotipo *Globigerinoides ruber s.s* está empobrecido en el mismo (Ver apéndice 2). Así mismo en las cuatro localidades el intervalo de la profundidad de calcificación del morfotipo *Globigerinoides ruber s.s* fue más superficial, en comparación con el de *Globigerinoides ruber s.l* cuya composición isotópica del oxígeno ( $\delta^{18}\text{O}_{FP}$ ) indica que el intervalo de su profundidad de calcificación es más profundo (Ver apéndice 1). Debido a la consistencia en el intervalo de la profundidad de calcificación del morfotipo *Globigerinoides ruber s.s* en

las cuatro localidades de muestreo en aguas más superficiales y cálidas durante el verano se optó por elegir este morfotipo para la investigación.

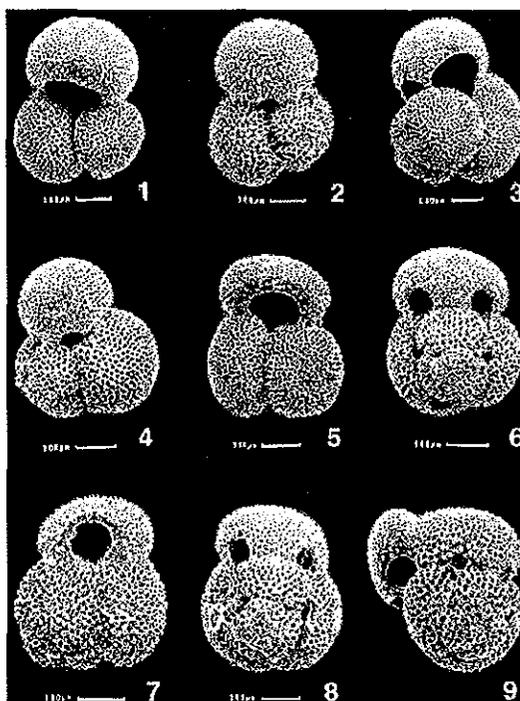


Figura 4. 1 - 4 *Globigerinoides ruber s.s* y 5 - 9 *Globigerinoides ruber s.l.*

**VI.3** Elaborar y calibrar un índice a partir de las composiciones isotópicas del oxígeno con información sobre la estratificación de la capa de mezcla

**VI.3.1** Relación entre los valores de  $\delta^{18}\text{O}_c$  calculados a partir de los perfiles de temperatura y salinidad con los valores de densidad del agua en las cuatro localidades.

Debido a que la composición isotópica del oxígeno en la calcita en equilibrio calculada en este estudio a partir de la ecuación de Bemis *et al.* (1998) depende de la temperatura y salinidad variables que a su vez controlan la densidad de las masas de agua procedimos a relacionar los valores de  $\delta^{18}\text{O}_c$  en equilibrio calculada para cada localidad con la densidad del agua obtenida con los datos de temperatura y salinidad de cada localidad.

$$\rho = f(T, \Sigma) - 1000 \text{ kg}/\mu^3 \quad (3)$$

**VI.3.2** Selección de los foraminíferos plácticos con información sobre la capa de mezcla en verano y conversión de sus diferencias en las composiciones isotópicas del oxígeno en diferencias de densidad.

Basándonos en la consistencia de los intervalos de la profundidad de calcificación de dos de las especies de foraminíferos plácticos analizados, encontramos que *G.ruber s.s* calcifica en la superficie y solo durante el verano y *N.dutertrei* calcifica preferentemente en la profundidad y en verano. Se utilizó la diferencia de la composición isotópica del oxígeno entre ambas especies como una medida del gradiente de densidad de la capa de mezcla en verano.

De esta forma podemos utilizar la diferencia de la composición isotópica del oxígeno entre ambas especies como un índice de las diferencias de densidad e indirectamente de la estratificación de la capa de mezcla para posteriormente utilizarlo para la reconstrucción de la variabilidad de la capa de mezcla durante verano en la región sur del sistema de la Corriente de California.

**VI.4** Validar el índice de estratificación de la capa de mezcla en la región sur del sistema de la Corriente de California utilizando un registro sedimentario de 50 años comparado con una serie de tiempo instrumental.

**VI.4.1** Elaboración de una serie de tiempo a partir del índice de estratificación de la capa de mezcla reconstruido a partir de un registro sedimentario de los últimos 50 años en la cuenca de San Lázaro.

Se colectó un núcleo de sedimento en la cuenca de San Lázaro (Figura 1), se cortó en láminas de 2mm perpendicular al eje de la profundidad para un periodo que estimamos representa los últimos 50 años. Se estima que cada una de estas láminas abarcan entre 1-3 años para este núcleo BAP96-6C. La cronología de este núcleo se elaboró a partir del exceso de  $^{210}\text{Pb}$  y  $^{137}\text{Cs}$  con la que se estimó una tasa de sedimentación de 1.5 mm/a que se discute en Esparza *et al.* (2007).

Se obtuvieron las determinaciones isotópicas del oxígeno en las láminas que habíamos cortado y lavado previamente de los foraminíferos plácticos *G. ruber s.s* y *N. dutertrei*, para un periodo que abarcan los últimos 50 años. Se tomaron estas dos especies debido a sus preferencias por los intervalos de profundidad en la columna de agua en los primeros 10-20 m de *G. ruber s.s.* y entre los 40-60 m de *N. dutertrei* para calcular sus diferencias de densidad. A partir de las diferencias en sus composiciones isotópicas de oxígeno transformadas a diferencias de densidad (Índice de estratificación de la capa de mezcla) de ambas especies se obtuvo una reconstrucción de la estratificación de la capa de mezcla en la cuenca San Lázaro para los últimos 50 años.

**VI.4.2** Comparación de la serie de tiempo del índice de la estratificación de la capa de mezcla en la cuenca de San Lázaro con una serie de tiempo instrumental de las anomalías de temperatura en el ecuador capturada por el índice El Niño-Oscilación Austral (ENOA).

Se elaboró una gráfica en donde se comparó la reconstrucción obtenida con el índice de la estratificación de la capa de mezcla en la cuenca de San Lázaro para los últimos 50 años con una serie de tiempo instrumental de las anomalías de temperatura en el ecuador capturada por el índice El Niño-Oscilación Austral (ENOA) de la base datos de la NOAA obtenida de la página <http://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/enso/enso-links.php>. También se elaboró una prueba estadística donde se obtuvo el coeficiente de correlación entre estas dos reconstrucciones en el programa MATLAB para conocer estadísticamente su relación.

**VI.5** Reconstruir la variabilidad de la capa de mezcla del sur del sistema de la Corriente de California para los últimos 400 años e interpretar que procesos océano-climáticos están controlando la variabilidad de la capa de mezcla en la región meridional del SCC

**VI.5.1** Elaboración de una serie de tiempo del índice de estratificación de la capa de mezcla reconstruido a partir de un registro sedimentario que abarca los últimos 400 años en la cuenca San Lázaro

Se colectó un núcleo de sedimento en la cuenca de San Lázaro (Figura 1), en la campaña oceanográfica PCM – 2000 a bordo de buque oceanográfico *BO/El Puma* el núcleo se obtuvo a 540 m de profundidad y fue extraído mediante un nucleador de Kasten.

El núcleo fue cortado en láminas de 2-3 mm perpendicular al eje de la profundidad. Se estima que cada una de estas láminas contiene registros que abarcan entre 1-5 años.

La cronología de este núcleo se estableció con la ayuda del radiocarbono 14 y se estimó una tasa de sedimentación de 1.1 mm/a.

Se obtuvieron las determinaciones isotópicas del oxígeno ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{FP}}$ ) de *G. ruber s.s* y *N. dutertrei* correspondientes a los sedimentos depositados durante los últimos 400 años y a partir de las diferencias en su composiciones isotópicas del oxígeno transformadas a diferencias de densidad (Índice de estratificación de la capa de mezcla), se obtuvo una reconstrucción de la estratificación de la capa de mezcla en la cuenca San Lázaro para los últimos 400 años.

**VI.5.2** Comparación de la reconstrucción obtenida a partir del índice de la estratificación de la capa de mezcla que abarca los últimos 400 años en la cuenca de San Lázaro con una reconstrucción de las anomalías de temperatura en HN obtenida por Mann *et al.* (2008) a partir de los anillos de los árboles

Para conocer si la variabilidad de la estratificación de la capa de mezcla del sur del SCC, en los últimos 400 años tiene alguna relación con el gradiente de presión en el HN. Se elaboró una gráfica donde se comparó la reconstrucción obtenida con el índice de la estratificación

de la capa de mezcla en la cuenca de San Lázaro en los últimos 400 años, con una serie de tiempo de las anomalías de temperatura en el Hemisferio Norte a partir de los anillos de los árboles, hecha por Mann *et al* (2008), la base de datos de obtuvo de <http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/recons.html>. También se elaboró una prueba estadística donde se obtuvo el coeficiente de correlación entre estas dos reconstrucciones en el programa MATLAB para conocer estadísticamente la relación entre ellas.

VI.5.2 Comparación de la reconstrucción obtenida a partir del índice de la estratificación de la capa de mezcla que abarca los últimos 400 años en la cuenca de San Lázaro con una reconstrucción de las anomalías de presión en el ecuador a partir del del Índice de la Oscilación Austral (ISA) reconstruida por Jones y Mann (2004).

Para conocer si la variabilidad de la estratificación de la capa de mezcla del sur del SCC en los últimos 400 años obedece a procesos océano-climáticos en el ecuador. Se elaboró una gráfica donde se comparó la reconstrucción obtenida con el índice de la estratificación de la capa de mezcla en la cuenca de San Lázaro en los últimos 400 años, con una serie de tiempo de las anomalías de presión en el ecuador capturada por el Índice de la Oscilación Austral (ISA) reconstruida por Jones y Mann (2004), la base de datos se obtuvo de <http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/recons.html>.

## VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

**VII.1** Intervalos de la profundidad de calcificación de *Golbigerinoides ruber s.s.*, *Globigerina bulloides* y *Neoglobocadrina dutertrei* y consistencia espacial y estacional entre las cuatro localidades de estudio con diferente amplitud estacional de la temperatura en la capa de mezcla

VII.1.1 Perfiles estacionales de temperatura (T) y salinidad (S) en la columna de agua en las cuatro localidades de estudio

En la figura 5 se observan los perfiles de los valores de  $\delta^{18}\text{O}_c$  para cada localidad (Cuenca San Lázaro, cuenca Pescadero, cuenca El Carmen y cuenca Bahía de la Paz) obtenidos a partir de la base de datos WODW y aplicando a la ecuación de Bemis *et al.* (1998).

En todas las gráficas el eje de las ordenadas representa la profundidad de la columna de agua, el eje de las abscisas representa los valores de  $\delta^{18}\text{O}_c$  calculados a partir de la ecuación de Bemis *et al.* (1998) y las líneas de colores continuas y discontinuas representan los perfiles estacionales de la composición isotópica del oxígeno en la calcita en equilibrio hasta los 150 m en la columna de agua.

**La cuenca San Lázaro** se encuentra en el sur del SCC bañada por el flujo de aguas frías y relativamente menos salinas procedentes de las altas latitudes hacia el ecuador, que se intensifica durante primavera y principios del verano por el efecto de los vientos del noroeste los que a su vez propician el bombeo de Ekman costero y las surgencias asociadas de aguas subsuperficiales mas frías y ricas en nutrientes (Esparza-Alvarez *et al.* 2007). Las temperaturas superficiales medias de esta cuenca oscilan entre un mínimo de 17°C durante la primavera a un máximo de 23.3°C a comienzos del otoño (Tabla I).

**La cuenca El Carmen** se encuentra influenciada por el agua ecuatorial durante el verano período en el que llega a alcanzar las máximas temperaturas superficiales del mar (TSM) de 31°C, mientras que durante el invierno su localización en el centro del Golfo de California le confiere las características de un clima más continental y frío llegando a observarse mínimos en sus TSM entre los 16-17°C (Thunell, 1998, Herguera, 2003). (Tabla I).

**La cuenca Pescadero** se encuentra en el suroeste del Golfo de California, durante el invierno las temperaturas en la superficie son 9°C más frías que en verano, durante esta época del año los vientos provenientes del noroeste transportan aguas subsuperficiales relativamente más frías y ricas en nutrientes hacia la superficie (Lavin y Marinone, 2003). Las temperaturas superficiales medias de esta cuenca oscilan entre los 21.5°C en invierno y 30°C durante el verano (Tabla I).

**La cuenca Bahía de la Paz** se encuentra al sur del Golfo de California presenta una mayor influencia en superficie de las aguas de origen ecuatorial con temperaturas cálidas y salinidades relativamente mayores. Durante invierno y primavera los vientos provenientes de norte provocan una circulación que favorece el transporte a la superficie de aguas subsuperficiales relativamente más frías y ricas en nutrientes (Lopez *et al.* 2001). Las temperaturas superficiales medias oscilan entre los 20.5°C en invierno y 29°C durante el verano (Tabla I).

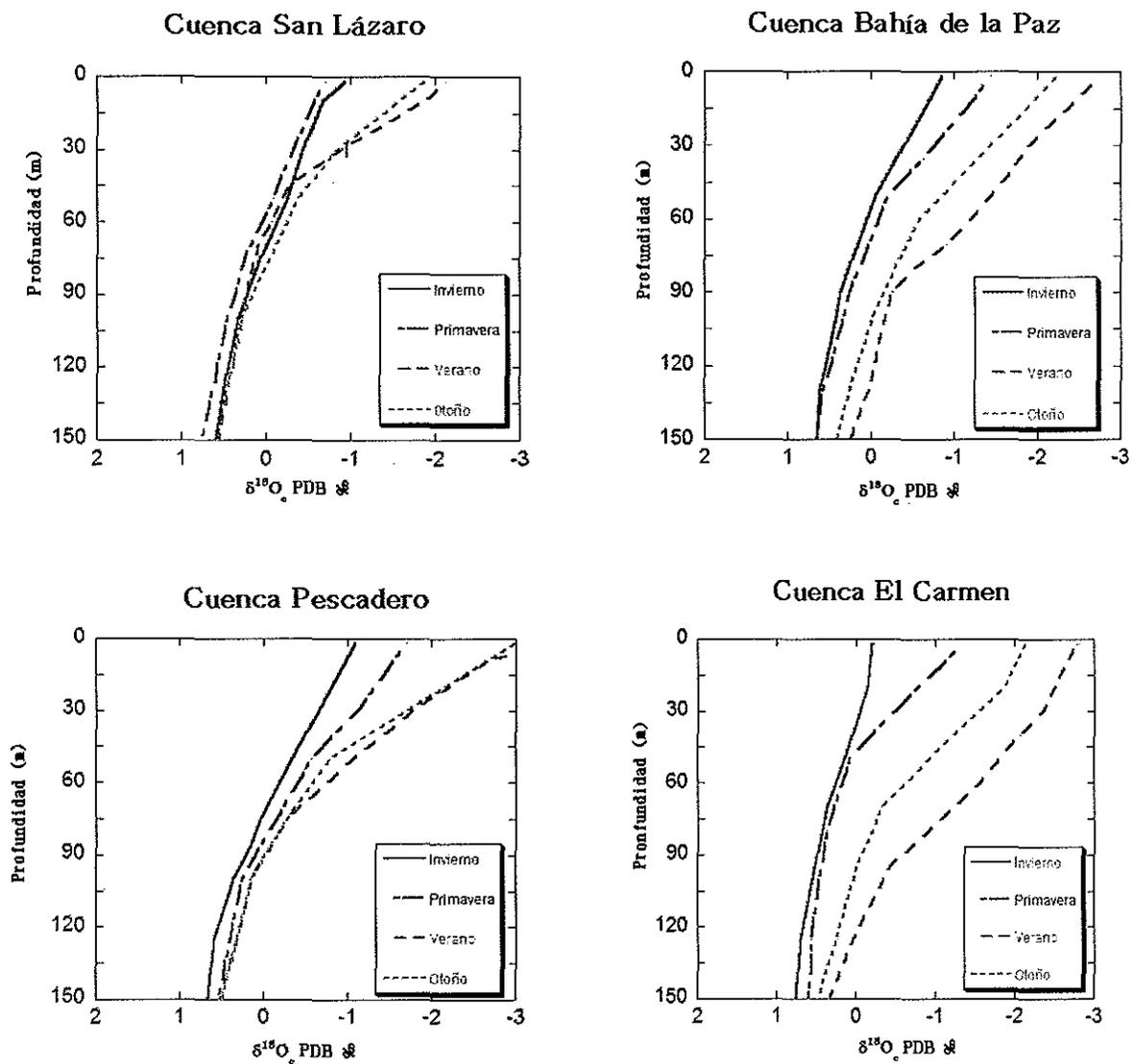


Figura 5. Perfiles estacionales de la composición isotópica del oxígeno en la calcita en equilibrio de temperatura y salinidad de la columna de agua en las cuatro localidades de estudio. Línea continua roja perfil de invierno; línea de trazos y puntos azul perfil de primavera; línea discontinua malva perfil de otoño, línea discontinua verde perfil de invierno).

Tabla I. Temperatura superficial promedio del mar de las cuatro localidades durante las cuatro estaciones del año calculado a partir de los datos de temperatura obtenidos de la base de datos WODV.

	<b>Ene-Feb-Mar</b> <b>Invierno</b>	<b>Abr-May-Jun</b> <b>Primavera</b>	<b>Jul-Agost-Sep</b> <b>Verano</b>	<b>Oct-Nov-Dec</b> <b>Otoño</b>
<b>Localidad</b>	Temperatura °C	Temperatura °C	Temperatura °C	Temperatura °C
Cuenca San Lázaro	18.67	16.92	22.99	23.31
Cuenca El Carmen	18.1	23.58	29.74	27.7
Cuenca Pescadero	21.61	24.52	30.04	28.58
Cuenca Bahía de La Paz	20.56	23.52	29.76	27.07

Una observación general en todas las localidades de estudio (Figura 5) es la diferente amplitud estacional de los valores de  $\delta^{18}\text{O}_c$ . Mientras que la cuenca San Lázaro se localiza en el SCC y es influenciada por aguas subárticas y tropicales; la cuenca Pescadero, El Carmen y Bahía de la Paz se localizan en el GC y son influenciadas por aguas tropicales y ecuatoriales.

VII.1.2 Determinaciones isotópicas del oxígeno ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{FP}}$ ) de las tres especies de foraminíferos (*Globigerinoides ruber s.s.*, *Glogigerina bulloides* y *Neogloboquadrina dutertrei*) en las cuatro localidades.

Se obtuvieron entre 4 y 20 de determinaciones isotópicas de cada especie para cada localidad (Tabla II). No todas las muestras tenían el número suficiente de especímenes de cada especie para realizar las determinaciones isotópicas, razón por la que el número de determinaciones es variable en las cuatro localidades.

Tabla II. Número de determinaciones isotópicas ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{FP}}$ ) de *G.ruber s.s*, *G.bulloides* y *N.dutertrei* analizada para cada localidad.

	Cuenca San Lázaro	Cuenca Bahía de la Paz	Cuenca Pescadero	Cuenca El Carmen
<i>G.ruber s.s</i>	4	9	9	3
<i>G. bulloides</i>	15	10	10	5
<i>N. dutertrei</i>	20	4	18	3

VII.1.3 Estimación del intervalo de la profundidad de calcificación en la columna de agua preferente de las tres especies de foraminíferos y evaluación de su consistencia espacial y estacional entre las cuatro localidades.

A partir de la comparación de los valores de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{FP}}$  determinados para cada especie con los valores de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{c}}$  calculados a partir de la ecuación de Bemis *et al.* (1998) para cada localidad se obtuvo el intervalo preferente de calcificación en la columna de agua de las tres especies de foraminíferos plácticos.

#### Cuenca San Lázaro

En esta cuenca *Globigerinoides ruber s.s* presentó valores de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{PF}}$  entre -1.0 y -2.45‰ que corresponden a profundidades entre la superficie y 30 m de profundidad durante las estaciones de verano y otoño según las estimaciones de los valores de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{c}}$ . *Neogloboquadrina dutertrei* presentó valores de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{PF}}$  entre -0.1 y 0.49‰, valores característicos entre los 50 hasta los 100 m durante todas las estaciones del año. *Globigerina bulloides* presentó valores de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{PF}}$  entre -1.3 y 0.06‰ pudiéndose encontrar superficialmente entre la superficie y los 60 m durante invierno y primavera y entre los 15 y 60 m de profundidad durante verano y otoño (Figura 6 y Tabla III).

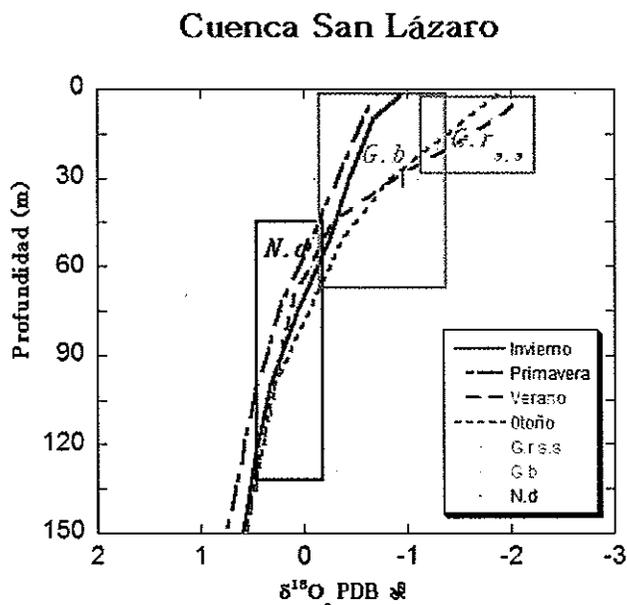


Figura 6. Estimación del intervalo de la profundidad de calcificación y estacionalidad de las tres especies de foraminíferos plácticos en la cuenca San Lázaro en el sistema de la Corriente de California, *Globigerinoides ruber s.s* (*G.r s.s* rectángulo malva); *Neogloboquadrina dutertrei* (*N.d* rectángulo negro); *Globigerina bulloides* (*G.b* rectángulo naranja). Las líneas representan los valores de  $\delta^{18}\text{O}_e$  calculados para cada estación: línea continua roja, invierno; línea discontinua azul, primavera; línea discontinua verde, verano; línea discontinua malva, otoño.

### Cuenca El Carmen

En la cuenca El Carmen *Globigerinoides ruber s.s* presentó valores de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{FP}}$  entre -2.3 y -2.4‰ que corresponden a los valores de  $\delta^{18}\text{O}_e$  de la superficie y los 40 m de profundidad durante verano. *Neogloboquadrina dutertrei* presentó valores de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{FP}}$  entre 1.00 y 0.57‰, característicos de los 50 y 140 m durante invierno y primavera y entre los 110 y 140 m durante el verano y otoño. *Globigerina bulloides* presentó valores de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{FP}}$  entre -0.20 y -0.89‰, lo cual corresponde a los 0 y 20 m en invierno y primavera y entre los 40 y 80 m durante el verano y otoño (Figura 7 y Tabla III)

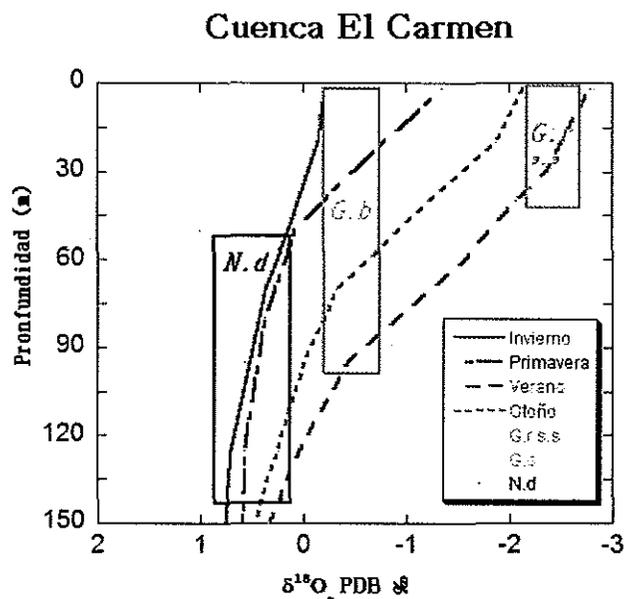
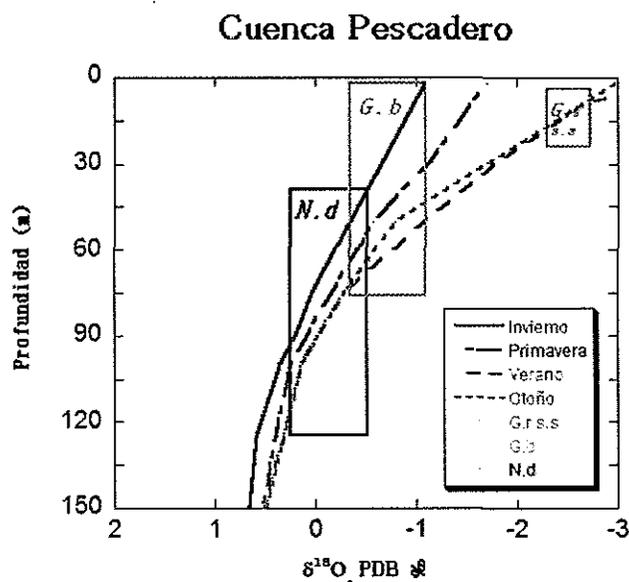


Figura 7. Estimación del intervalo de la profundidad de calcificación y estacionalidad de las tres especies de foraminíferos plácticos en la cuenca El Carmen, Golfo de California. *Globigerinoides ruber s.s* (*G.r s.s* rectángulo malva); *Neogloboquadrina dutertrei* (*N.d* rectángulo negro); *Globigerina bulloides* (*G.b* rectángulo naranja). Las líneas representan los valores de  $\delta^{18}\text{O}_c$  calculados para cada estación: línea continua roja, invierno; línea discontinua azul, primavera; línea discontinua verde, verano; línea discontinua malva, otoño.

### Cuenca Pescadero

En la cuenca Pescadero *Globigerinoides ruber s.s* presentó valores de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{FP}}$  entre -2.23 y -2.60‰ lo cual según las estimaciones de los valores de  $\delta^{18}\text{O}_c$  implica que se pudiesen encontrar desde la superficie hasta los 30 m de profundidad durante las estaciones de verano y otoño. *Neogloboquadrina dutertrei* presentó valores de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{FP}}$  entre 0.35 y -1.16‰ valores encontrados entre los 40 y 120 m de profundidad durante las cuatro estaciones del año. *Globigerina bulloides* presentó valores de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{FP}}$  entre -0.5 y -1.13‰ valores encontrados entre los 10 y 60 m durante invierno, y entre los 30 y 60 m durante la primavera y entre 40 y 70 m durante el otoño (Figura 8 y Tabla III).



**Figura 8.** Estimación del intervalo de la profundidad de calcificación y estacionalidad de las tres especies de foraminíferos plácticos en la cuenca Pescadero, Golfo de California. *Globigerinoides ruber s.s* (*G.r s.s* rectángulo malva); *Neogloboquadrina dutertrei* (*N.d* rectángulo negro); *Globigerina bulloides* (*G.b* rectángulo naranja). Las líneas representan los valores de  $\delta^{18}\text{O}_c$  calculados para cada estación: línea continua roja, invierno; línea discontinua azul, primavera; línea discontinua verde, verano; línea discontinua malva, otoño.

#### **Cuenca Bahía de la Paz.**

En la Bahía de la Paz, *Globigerinoides ruber s.s* presentó valores de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{FP}}$  entre -2.0 y -2.95‰, lo cual corresponde a los 0 y 20 m de profundidad durante verano y solo en superficie durante en otoño según los valores de  $\delta^{18}\text{O}_c$  entre. *Neogloboquadrina dutertrei* presentó valores de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{FP}}$  entre 0.21y -0.47‰ encontrándose en los 45 y 80 m durante invierno y primavera y entre los 70 y 140 m durante el verano y otoño. *Globigerina bulloides* presentó valores de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{FP}}$  entre -0.32 y -1.03‰ encontrándose cerca a la superficie (entre los 10 y 45 m) durante invierno y primavera y entre los 40 y 80 m durante el verano y otoño (Figura 9 y Tabla III).

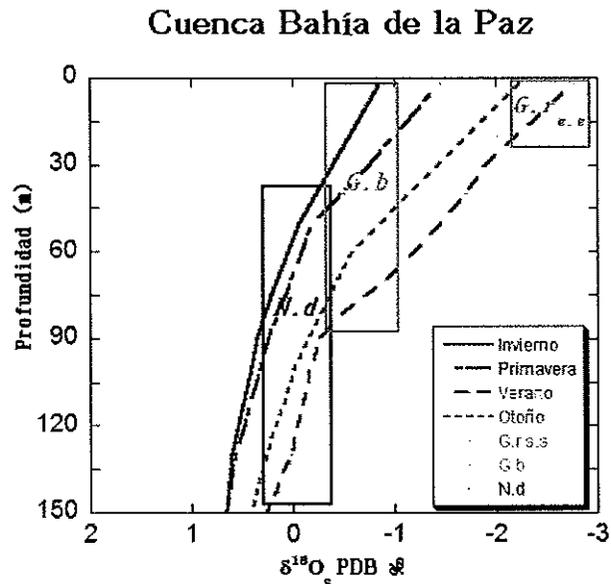


Figura 9. Estimación del Intervalo de la profundidad de calcificación y estacionalidad de las tres especies de foraminíferos plácticos en la cuenca Bahía de la Paz, Golfo de California. *Globigerinoides ruber s.s* (G.r s.s rectángulo malva); *Neogloboquadrina dutertrei* (N.d rectángulo negro); *Globigerina bulloides* (G.b rectángulo naranja). Las líneas representan los valores de  $\delta^{18}O_a$  calculados para cada estación: línea continua roja, invierno; línea discontinua azul, primavera; línea discontinua verde, verano; línea discontinua malva, otoño.

Como síntesis de los resultados obtenidos del intervalo de la profundidad de calcificación y estacionalidad de las tres especies de foraminíferos, se puede observar un patrón en las estimaciones del intervalo de la profundidad de calcificación que es consistente al comparar las cuatro localidades:

**Tabla 3. Intervalos de la profundidad de calcificación y estacionalidad estimados para cada especie de foraminífero pláctico en las cuatro localidades estudiadas.**

Lugar geográfico Especie	Cuenca San Lázaro	Cuenca Bahía de la Paz	Cuenca El Carmen	Cuenca Pescadero
	Profundidad-Estacionalidad			
<i>Globigerinoides ruber s.s</i>	10-30 m Verano-Otoño	10-20 m Verano	10-30 m Verano	10-30 m Verano-Otoño
<i>Globigerina bulloides</i>	10-60 m Invierno-primavera 15-60 m Verano-otoño	10-45 m Invierno-primavera 45-80 m Verano-Otoño	20-40 m Primavera 40-80 m Verano-otoño	10-60 m Invierno 30-60 m Primavera 40-70 m Verano-Otoño
<i>Neogloboquadrina dutertrei</i>	50-100 m Cuatro estaciones	45-80 m Invierno-primavera 70-140 m Verano-Otoño	50-140 m Invierno-primavera 110-140 Verano-otoño	40-120 m Cuatro estaciones

Ortiz *et al.* (1995) reportan que el hábitat de *Globigerinoides ruber* está limitado en profundidad por la penetración de la luz en la columna de agua, debido a que esta especie exhibe relaciones simbióticas con células fotosintéticas (dinoflagelados, diatomeas y crisofitas). Ellos reportan que el límite inferior de tolerancia térmica de *Globigerinoides ruber* es de 14° C. Faibanks *et al.* (1982) y Ravelo y Faibanks (1992) reportan que *Globigerinoides ruber* es una especie indicadora de la temperatura superficial del mar en regiones tropicales y subtropicales y que precipita su estructura calcárea en la capa de mezcla por encima de la termoclina estacional. Por otro lado Thunell *et al.* (1983)

reporta que las especies espinosas como *Globigerinoides ruber* presentan una marcada estacionalidad encontrándose cerca de la superficie en aguas cálidas y durante el verano. Las observaciones del hábitat de *Globigerinoides ruber* descritas por diferentes autores ya mencionados coincide con las observaciones de este estudio sobre la preferencia en la profundidad y estacional en la columna de *Globigerinoides ruber s.s* encontrándose cerca de la superficie (entre los 0 y 30 m de profundidad) y solo durante el verano en las cuatro localidades (Tabla III).

Por otro lado, *Neogloboquadrina dutertrei* es una especie fundamentalmente herbívora que comúnmente se encuentra asociada al máximo de clorofila y de producción primaria (Field, 2004). Trabajos como los de Faibanks *et al.* 1982, asocian a *Neogloboquadrina dutertrei* con el máximo de clorofila profundo en el Atlántico, mientras Ravelo y Fairbaks (1992) señalan que la profundidad a la que *Neogloboquadrina dutertrei* deposita su carbonato de calcio puede localizarse bien en la termoclina estacional o por debajo de esta.

El intervalo de la profundidad de calcificación de *Neogloboquadrina dutertrei* en este estudio en la cuenca de San Lázaro durante verano y otoño se estimó entre los 50 y 100 m de profundidad, mientras que en el Golfo de California se encuentra entre los 40 y 140 m de profundidad durante el verano y otoño (Tabla III). Esta profundidad coincide con el máximo de clorofila reportado por Valdez (2008) y Field (2004) para el sur de la Corriente de California. Valdez-Holguin (1995) Hidalgo-Gonzales y Alvarez-Borrego (2001) reportan que el máximo de profundidad de clorofila en el Golfo de California durante el verano varía localmente entre los 25 y 50 m de profundidad, como Cepeda-Morales *et al.* (2009) encuentra en el Pacífico Oriental Mexicano un segundo máximo de clorofila profundo entre los 70 y 140 m de profundidad más cercano a la profundidad de calcificación estimada en este estudio.

El intervalo de la profundidad de calcificación de la especie *Globigerina bulloides* se estimó entre los 10 y 60 m de profundidad durante primavera e invierno en todas las localidades de estudio (Tabla III). En contraste durante verano y otoño se observa entre los 20 y 60 m en la cuenca de San Lázaro y entre 50 y 80 m de profundidad en las otras tres

localidades (Cuenca Pescadero, El Carmen y Bahía de la Paz) (Tabla III). Sin embargo en estudios como los de Field (2004) y Curry *et al.* (1992) señalan que *Globigerina bulloides* presenta su mayor abundancia en la superficie, y que exhibe preferencia por aguas frías y ricas en nutrientes, por lo que generalmente se asocia a zonas de surgencias. Ortiz (1995) sugiere que la baja abundancia de *Globigerina bulloides* fuera de la costa se debe en gran medida a las limitaciones por alimento.

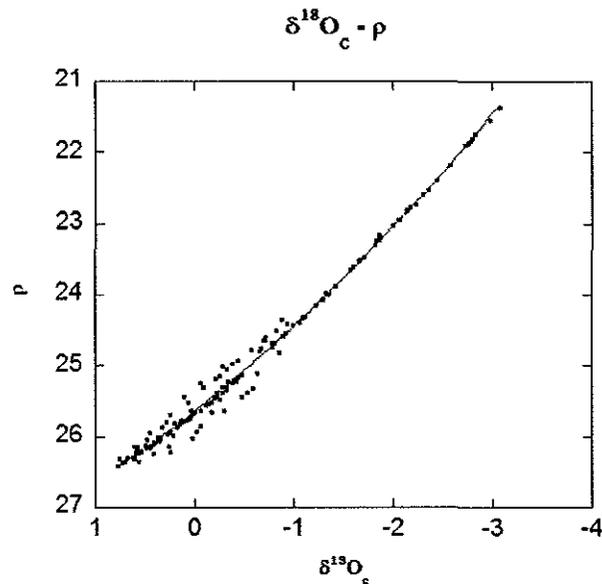
En la Corriente de California el periodo de surgencias se produce durante la primavera y principios de verano (Lynn y Simpson, 1987) mientras en el Golfo de California se produce durante el invierno y la primavera (Lavin *et al.* 1997) cuando se observan las aguas más frías y ricas en nutrientes en superficie. Tomando esto en consideración durante el invierno y primavera se podría encontrar a *Globigerina bulloides* en la cuenca Pescadero, El Carmen y Bahía de la Paz ubicadas en el Golfo de California y en primavera-verano en cuenca San Lázaro ubicada en el sur del sistema de la Corriente de California (Tabla III).

Las observaciones obtenidas sobre la consistencia en el intervalo de la profundidad de calcificación de las tres especies de foraminíferos en las distintas regiones del SCC influenciada por aguas subárticas y tropicales y del GC influenciado por aguas tropicales y ecuatoriales implican una alta fidelidad estacional y en profundidad de estas tres especies y nos muestran su utilidad para reconstruir las condiciones físicas de la capa de mezcla

## VII.2 Índice de la estratificación de la capa de mezcla a partir de las composiciones isotópicas del oxígeno en los foraminíferos plácticos

### VII.2.1 Relación entre los valores de $\delta^{18}\text{O}_c$ calculados a partir de los perfiles de temperatura y salinidad con los valores de densidad del agua en las cuatro localidades

En la figura 10 se puede observar la relación no lineal ( $y=25.6 + 1.09x + 0.1008^2x$ ,  $r=0.99$ ) entre los valores de  $\delta^{18}\text{O}_c$  con la densidad del agua considerando los datos de las cuatro localidades. El alto nivel de correlación se debe a que tanto los valores de  $\delta^{18}\text{O}_c$  y la densidad del agua se calculan con las mismas variables (temperatura y salinidad)



**Figura10.** Relación de la composición isotópica del oxígeno en la calcita equilibrio ( $\delta^{18}\text{O}_c$ ) calculada y la densidad del agua.

La alta correlación entre los valores de  $\delta^{18}\text{O}_c$  y la densidad nos permite convertir las mediciones de la composición isotópica del oxígeno de los foraminíferos pláncicos en función de la densidad del agua para poder hacer inferencias sobre la capa de mezcla.

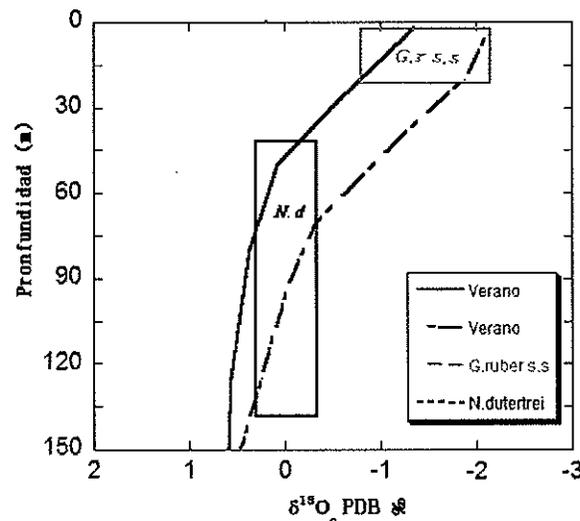
**VII.2.2** Selección de los foraminíferos pláncicos con información sobre la capa de mezcla en verano y conversión de sus diferencias en las composiciones isotópicas del oxígeno en diferencias de densidad

En este estudio vamos a utilizar los valores de la composición isotópica del oxígeno ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{FP}}$ ) de *G. ruber s.s* y *N.dutertrei* por su información sobre las condiciones de la capa de mezcla durante verano.

En la figura 11 se muestran los intervalos de la profundidad de calcificación de *G.ruber s.s* y *N.dutertrei* deducidos de sus valores de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{FP}}$ . Observamos cómo la diferencia entre los

valores de la composición isotópica del oxígeno de la especie que calcifica en superficie (*G.ruber s.s*) con respecto a la que lo hace preferentemente en profundidad (*N.dutertrei*) se puede relacionar con la estratificación de la capa de mezcla en verano e indirectamente con la profundidad de la termoclina estacional.

Así mismo en la figura 11 se ilustran un ejemplo de dos perfiles que muestran situaciones diferentes de verano: en el perfil azul las dos especies muestran una mayor diferencia isotópica lo cual refleja una mayor estratificación de la capa de mezcla o una termoclina estacional más profunda. En contraste, en el caso del perfil la diferencia isotópica entre ambas especies es menor, lo cual indica una menor estratificación de la capa de mezcla o una termoclina estacional más somera.



**Figura 11.** Intervalo de la profundidad de calcificación de *G.ruber s.s* y *N.dutertrei* en donde las diferencias de su composición isotópica de oxígeno representan dos situaciones diferentes de la capa de mezcla en verano. La línea punteada representa aguas superficiales más cálidas y la línea continua representa unas aguas superficiales más frías.

La diferencia isotópica entre las dos especies ( $\Delta\delta^{18}\text{O}_{\text{Gr-Nd}}$ ) refleja a su vez la diferencia en la densidad del agua entre los intervalos de profundidad de calcificación de cada una de las especies, considerando la profundidad promedio de cada una. Esto se debe a que la composición isotópica del oxígeno en la calcita en equilibrio depende de la salinidad y temperatura, variables que a su vez controlan la densidad de las masas de agua.

De esta forma podemos utilizar la diferencia de la composición isotópica del oxígeno entre ambas especies ( $\Delta\delta^{18}\text{O}_{\text{Gr-Nd}}$ ) como indicadores de la densidad del agua. En la figura 12 se muestra un ejemplo donde se observan dos perfiles con situaciones de verano diferente: un perfil con aguas superficiales más frías (café) y el otro con agua superficiales más cálidas (azul). Los intervalos de profundidad de *G.ruber s.s* y *N.dutertrei* obtenidos a partir de su composición isotópica del oxígeno están convertidos en valores de densidad ( $\rho$ ) por la relación entre estas dos variables. La diferencia entre la profundidad promedio de calcificación de la especie en superficie (*G.ruber s.s*) con respecto a la especie en profundidad (*N.dutertrei*) refleja la densidad entre la capa superficial y la termoclina en la capa de mezcla.

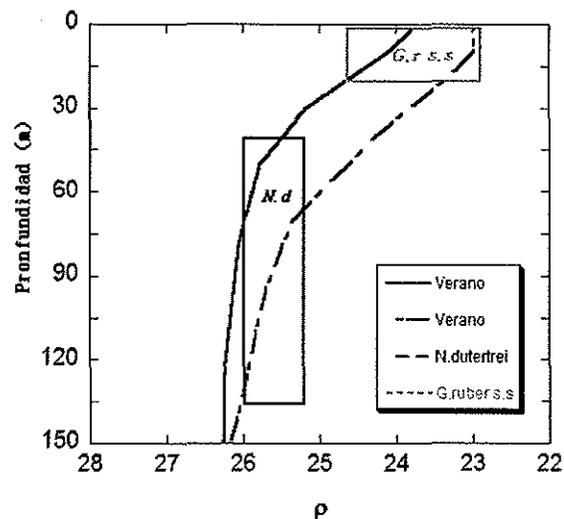


Figura 12. Intervalo de la profundidad de calcificación de *G.ruber s.s* y *N.dutertrei* en donde las diferencias de sus densidades representan dos situaciones diferentes de la capa de mezcla en verano.

La estratificación de la capa de mezcla en la Corriente de California varía en distintas escalas de tiempo, desde la estacional, a la interanual como durante los fenómenos de *El Niño* y de *La Niña*. Mackas (2005) señala que durante fenómenos de *El Niño* la estratificación de la columna de agua es mayor debido al calentamiento de la capa de mezcla; en contraste durante los fenómenos de *La Niña* se observa una menor estratificación de la columna de agua debido a un enfriamiento de la capa de mezcla.

En el diagrama de T-S sobre el que se han graficado las isopicnas (Figura 13) se muestra un perfil en profundidad del evento de *El Niño* durante 1997 y un perfil en profundidad del evento de *La Niña* durante 1999 en el sur del Sistema de la Corriente de California (25° N- 114° W). Estos perfiles corresponden al verano y se obtuvieron de la base de datos de temperatura y salinidad de IMECOCAL. En la figura 14 se muestra otro gráfico T-S con isopicnas en el que se representa un perfil de los valores T-S en profundidad durante el evento de *El Niño* de 1959 y de *La Niña* de 1952 en el sur del Sistema de la Corriente de California (25° N- 114° W) durante el verano, obtenidos a partir de la base de datos de temperatura y salinidad WODV. Como se puede observar en los dos diagramas la diferencia de la densidad del agua entre los 10 y 60 m, equivalente a la media del intervalo de profundidad de calcificación de las dos especies de foraminíferos plácticos de estudio (*G.ruber s.s* y *N.dutertrei*) es mayor durante un fenómeno de *El Niño*. Este refleja una mayor estratificación de la capa de mezcla o una termoclina estacional más profunda, que durante *La Niña*, cuya menor diferencia de densidad refleja una menor estratificación de la capa de mezcla y/o una termoclina estacional más somera.

Durazo *et al.* (2002) describen cambios en la estructura y circulación del océano en la costa oeste de Baja California durante *El Niño* del 97 y *La Niña* del 99, indicando anomalías de temperatura y salinidad positivas por encima de los 600 m con respecto a las condiciones normales en esta región. En su gráfica T-S para el mes de octubre 1997- 1998 y junio 1998- 1999 se aprecian cómo durante el fenómeno de *El Niño* la temperatura y salinidad es consistentemente más altas que durante su transición a *La Niña*, (Figura 15), observación que confirma los perfiles de T-S obtenidos en este estudio a partir de los datos de T y S de la base de datos de IMECOCAL para el mismo periodo (Figura 13)

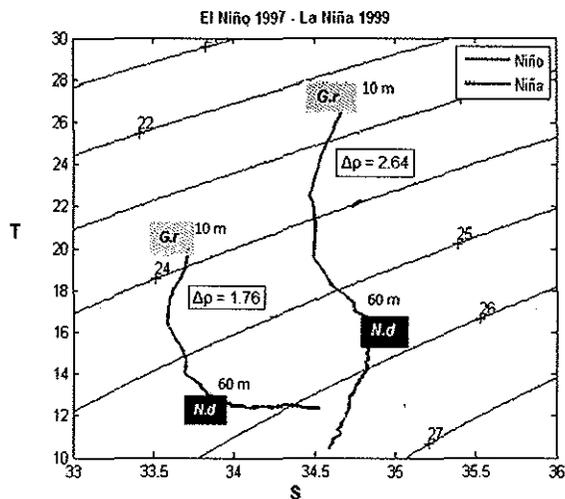


Figura 13. Diagrama T-S de un perfil en profundidad de los valores de T-S durante *El Niño* 1997 y un perfil en profundidad durante *La Niña* 1999. Sobre este diagrama hemos graficado las isopicnas para ilustrar el efecto del calentamiento/enfriamiento mayor/menor salinidad sobre la estructura de la densidad en la columna de agua. A si también se han sobrepuesto la media del intervalo de profundidad de calcificación de *G.ruber s.s* (rectángulo rosa) y *N.dutertrei* (rectángulo negro) y se observa cómo las diferencias de las densidades  $\Delta\rho$  son mayores durante un evento de *El Niño* que durante *La Niña*.

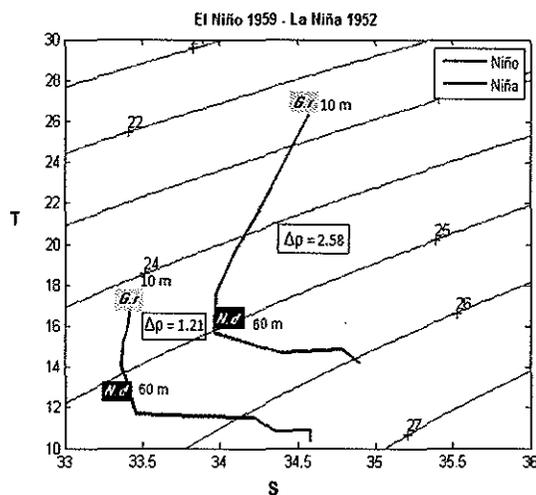


Figura 14. Diagrama T-S de un perfil en profundidad de *El Niño* 1959 en rojo y un perfil en profundidad de *La Niña* 1952 en azul. En este gráfico hemos sobrepuesto la media del intervalo de profundidad de calcificación de *G.ruber s.s* (rectángulo rosa) y *N.dutertrei* (rectángulo negro) y se aprecia cómo las diferencias en las densidades  $\Delta\rho$  son mayores durante los eventos de *El Niño* que durante *La Niña*.

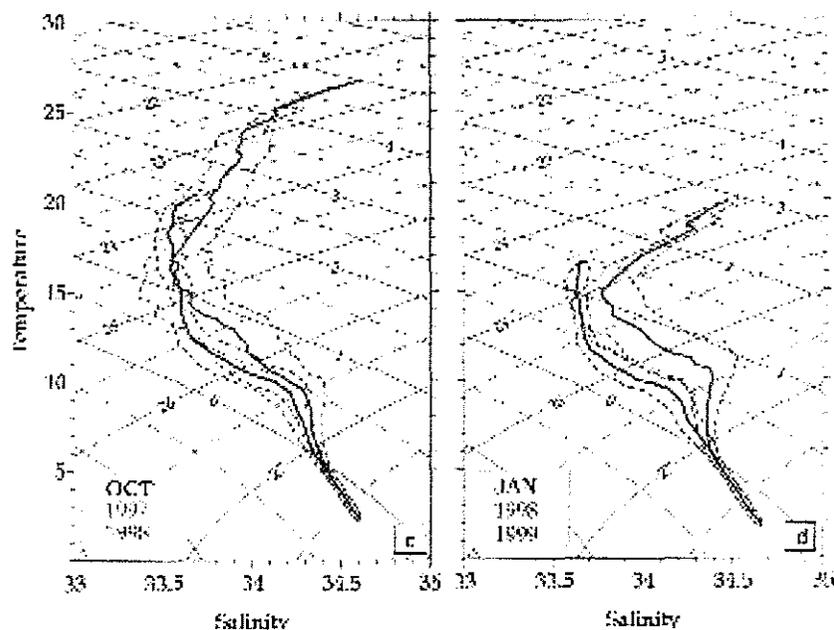


Figura 15. Diagrama T-S en el que se muestra un perfil en un evento *El Niño* y en un evento *La Niña* en la región de IMECOCAL (Durazo *et al.* 2002).

Los resultados y observaciones obtenidos en este estudio sobre la consistencia en la profundidad de calcificación de dos especies de los foraminíferos plácticos (*G.ruber s.s* y *N.dutretre*) fundamentan la utilidad que tiene el calcular las diferencias en la composición isotópica del oxígeno entre estas especies para estimar las diferencias en la densidad entre la superficie y la profundidad de la termoclina. Esto permite, de manera indirecta, el poder hacer inferencias sobre la estratificación de la capa de mezcla durante el verano

### VII.3 Validación del índice de estratificación de la capa de mezcla utilizando un registro sedimentario de 50 años comparado con una serie de tiempo instrumental

VII.3.1 Construcción de la serie de tiempo a partir del índice de estratificación de la capa de mezcla reconstruido a partir de un registro sedimentario de los últimos 50 años de la cuenca de San Lázaro

En la figura 16 se muestra la reconstrucción de la estratificación de la capa de mezcla para los últimos 50 años en la cuenca de San Lázaro en el sur del sistema de la Corriente de California representada como las diferencias entre las densidades de *G.ruber s.s* y *N.dutertrei* obtenida a partir de las diferencias en sus composiciones isotópicas del oxígeno (índice de estratificación de la capa de mezcla). La serie de tiempo presenta huecos de información debido a que algunas muestras de sedimento no tuvieron suficientes organismos para poder realizar determinaciones isotópicas confiables.

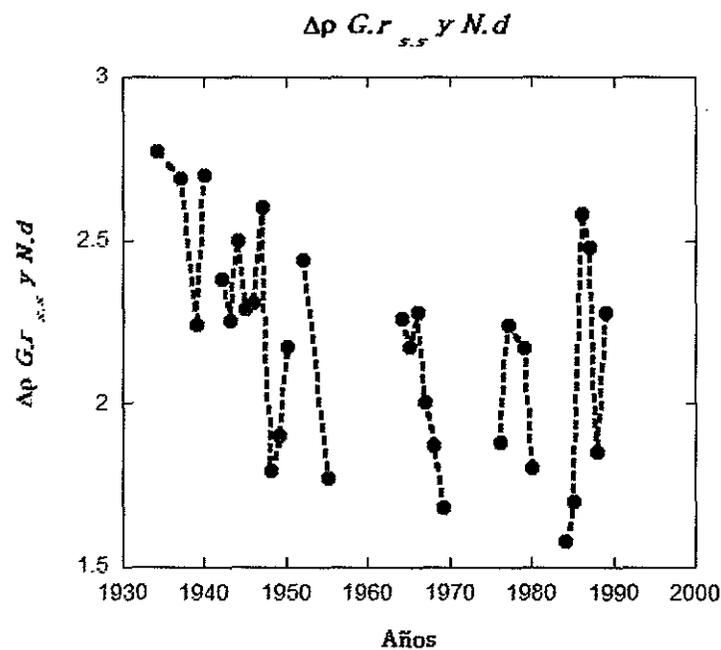


Figura 16. Reconstrucción obtenida de la diferencia de la densidad a partir de la diferencia en la composición isotópica del oxígeno de *G.ruber s.s* y *N.dutertrei* de la cuenca de San Lázaro en el sur del sistema de la Corriente de California para los últimos 50 años.

VII.3.2 Comparación de la serie de tiempo del índice de la estratificación de la capa de mezcla en la cuenca de San Lázaro con una serie de tiempo instrumental de las anomalías de temperatura en el Ecuador capturada por el índice El Niño-Oscilación Austral (ENOA).

Las diferencias de densidad entre la superficie y la termoclina estacional de mayor amplitud las observamos durante el ciclo estacional, esta diferencia es mínima durante la primavera cuando las temperaturas en superficie son las más frías del año y se maximiza a finales de verano cuando las temperaturas de la superficie llegan a sus valores máximos. A escala interanual los eventos de *El Niño* y *La Niña* aumentan o reducen la estratificación respectivamente como consecuencia de la propagación de ondas Kelvin procedentes del Ecuador hacia las costas orientales hasta la Corriente de California Mackas (2005). Esta variabilidad de origen ecuatorial capturada por el índice de *El Niño* y *la Oscilación Austral* (ENOA) debería de verse reflejada en el índice de la estratificación de la capa de mezcla obtenido de las diferencias isotópicas entre *G. ruber s.s* y *N. dutertrei* desarrollado en este trabajo.

La reconstrucción de las diferencias en la densidad para las últimas seis décadas obtenida para la cuenca de San Lázaro en el sur del sistema de la Corriente de California (Figura 16) se comparó con la reconstrucción de las anomalías de temperatura del índice de *El Niño* y *la Oscilación Austral* (ENOA) en el Ecuador (Figura 17). Se observa un paralelismo importante entre las dos series de tiempo a pesar de las discontinuidades de la reconstrucción. Los eventos de *El Niño* más importantes están realzados por los rectángulos amarillos mientras que los eventos de *La Niña* están realzados por rectángulos azules (Figura 18). Las series de tiempo tienen un coeficiente de correlación ( $R=0.44$ ,  $p=0.1$ ) lo que indica una relación estadística significativa. Estas observaciones confirman la alta fidelidad de este índice isotópico al forzamiento de origen ecuatorial, aunque no podamos descartar el control que localmente ejercen los vientos dominantes del noroeste o bien el bombeo de Ekman costero como por el rizo del viento hacia el océano abierto.

Diversos estudios han mostrado que las variaciones interanuales océano-climáticas observadas en el nordeste del Océano Pacífico están relacionadas con las variaciones océano climáticas en los trópicos asociados a los eventos de *El Niño* y *La Niña* (Simpson 1983, Emery y Hamilton 1985, Percy y Schoener 1987, Durazo 2002)

Pares *et al.* (1989) indica que esta relación puede ser explicada por dos vías o cómo una combinación de ambas: una oceánica y otra atmosférica. El primer forzamiento posible son las ondas de calor (ondas Kelvin) generadas en el Ecuador durante el fenómeno *El Niño* que se propagan a regiones extratropicales a lo largo de la costa produciendo anomalías físicas y biológicas en esta región; la segunda se refiere a una teleconexión atmosférica, relacionada con la celda Hadley, en la que la intensificación de las bajas Aleutianas provoca un debilitamiento en los vientos provenientes del Noroeste y ocasionan variaciones en los procesos de advección horizontales y verticales en el Sistema de la Corriente de California.

Estudios como los de Durazo (2009) y Durazo *et al.* (2005) muestran que las variaciones océano climáticas relacionadas con los cambios en la circulación atmosférica como el ENSO, influyen en las variaciones de las masas de agua pertenecientes al Sistema de la Corriente de California, ocasionando fluctuaciones en las características físicas de temperatura y salinidad, así como en la termoclina estacional. Durante un evento de *El Niño*, en la parte sur de la Corriente de California se produce una mayor intrusión de las aguas ecuatoriales hacia el norte que se caracterizan por presentar mayores temperaturas y salinidades ocasionando una fuerte estratificación de la capa de mezcla y una profundización de la termoclina estacional. Por el contrario durante un evento de *La Niña* se produce una mayor intrusión de las aguas subárticas hacia el sur, que se caracterizan por su menor temperatura y salinidad proceso que genera una débil estratificación de la capa de mezcla y una termoclina estacional más profunda.

Esta relación entre la reconstrucción de la estratificación de la capa de mezcla en el sur de la Corriente de California y la reconstrucción instrumental de las anomalías de temperatura ENOA (Índice de *El Niño* y la *Oscilación Austral*) en el Ecuador para los últimos 50 años

obtenida en este estudio (Figura 18) valida que las diferencias isotópicas entre *G.ruber s.s* y *N.dutertrei* pueden ser utilizadas para reconstruir la variabilidad interanual que el ENSO introduce en el sistema de la Corriente de California.

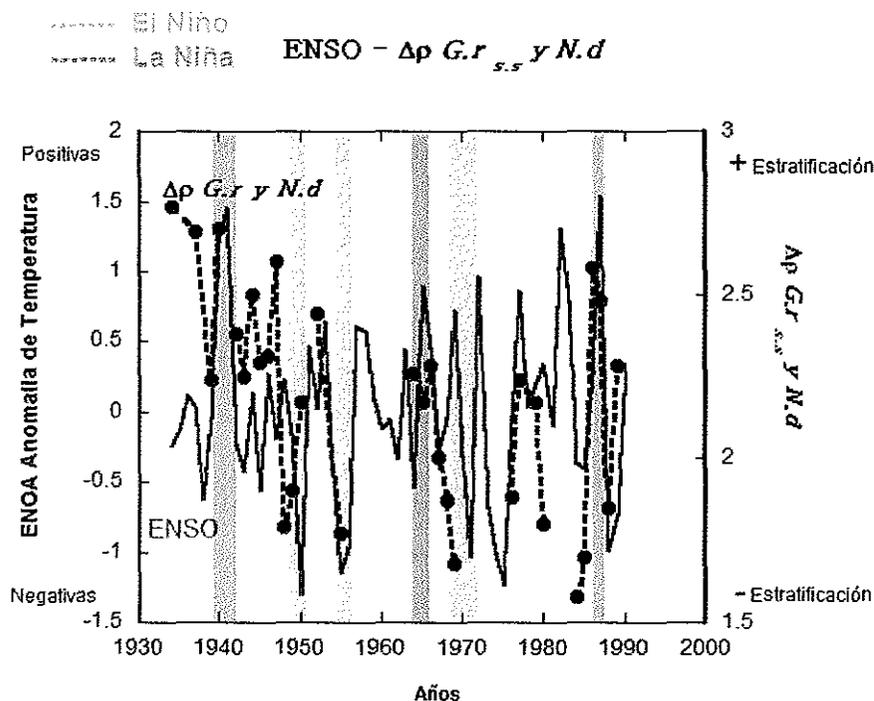


Figura 17. Comparación entre la reconstrucción de la estratificación de la capa de mezcla para los últimos 50 años a partir de la diferencia de densidad entre *G.ruber s.s* y *N.dutertrei* en el sur del sistema de la Corriente de California del núcleo BAP96-6C (línea discontinua azul con puntos, eje de las ordenadas de la derecha) con el índice de las anomalías de temperatura ENOA para los últimos 50 años (línea continua roja, eje de las ordenadas de la izquierda).

**VII.4** Reconstrucción de la variabilidad de la capa de mezcla del sur del sistema de la Corriente de California para los últimos 400 años e interpretación de los procesos océano-climáticos que pueden controlar la variabilidad de la capa de mezcla en la región meridional del SCC

VII.4.1 Serie de tiempo del índice de estratificación reconstruido a partir de un registro sedimentario que abarca los últimos 400 años en la cuenca San Lázaro

La validación del índice de las diferencias isotópicas entre *G.ruber s.s* y *N.dutertrei* nos permite ahora extender este tipo de reconstrucción de la variabilidad de la estratificación de la capa de mezcla para los últimos 400 años.

En la figura 18 se muestra la reconstrucción de la estratificación de la capa de mezcla para los últimos 400 años en la cuenca de San Lázaro en el sur del sistema de la Corriente de California representada como las diferencias entre las densidades de *G.ruber s.s* y *N.dutertrei* obtenida a partir de las diferencias en sus composiciones isotópicas del oxígeno (índice de estratificación de la capa de mezcla). La serie de tiempo presenta huecos de información debido a que algunas muestras de sedimento no tuvieron suficientes organismos para poder realizar determinaciones isotópicas confiables.

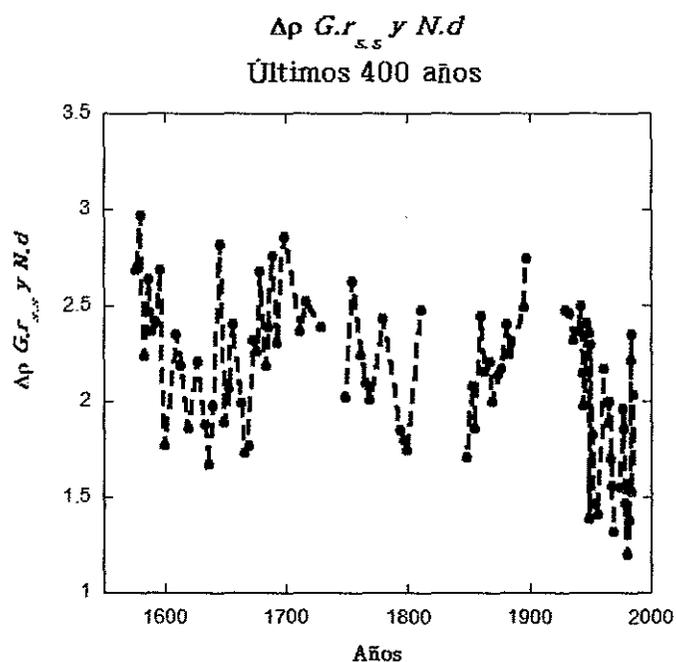


Figura 18. Reconstrucción obtenida a partir de la diferencia en la composición isotópica del oxígeno de la profundidad de calcificación de *G.ruber s.s* y *N.dutertrei* transformada a diferencias de densidad (índice de la capa de mezcla) en la cuenca de San Lázaro en el sur del sistema de la Corriente de California para los últimos 400 años.

VII.4.2 Comparación de la reconstrucción obtenida a partir del índice de la estratificación de la capa de mezcla que abarca los últimos 400 años en la cuenca de San Lázaro con una reconstrucción de las anomalías de temperatura en HN obtenida por Mann *et al.* (2008) a partir de los anillos de los árboles.

La reconstrucción obtenida a partir del índice de la estratificación de la capa de mezcla que abarca los últimos 400 años se comparó con una reconstrucción de las anomalías de temperatura en el Hemisferio Norte (HN) a partir de los anillos de los árboles por Mann *et al.* (2008). En la figura 20 se observa una relación negativa entre estas dos reconstrucciones con un coeficiente de correlación ( $r=-0.42$ ;  $p=0$ ). Esto indica que hay una relación negativa entre ambas reconstrucciones es decir cuando el HN presenta anomalías de temperatura

negativas el sur de la Corriente de California presenta una mayor profundidad en la estratificación de la columna de agua, lo cual implica que cuando el hemisferio Norte está en un modo cálido (frío) la Corriente de California se enfría (calienta) (Figura 19).

Sabemos que durante la primavera y el verano el continente se calienta más rápido que el océano y que estas diferencias de temperatura entre océanos y continentes generan gradientes en sus presiones atmosféricas que controlan la intensidad de los vientos. Durante períodos de mayor radiación solar, los continentes se calientan antes y más intensamente que los océanos. Las diferencias en la presión atmosférica que se generan entre el océano y el continente controlan la intensidad de los vientos alisios. La intensificación de estos vientos a lo largo de la costa, que en el sistema de la Corriente de California tiene una dirección noroeste-sureste, por un lado propician un mayor transporte de las aguas subárticas de las altas latitudes del Pacífico Norte a lo largo del SCC, características por su menor temperatura y salinidad. Por otro lado la intensificación de los vientos controla el bombeo de Ekman costero o los eventos de surgencias, que a su vez acarrearán aguas de la subsuperficie de menor temperatura y salinidad hacia la superficie. Ambos procesos tienden a disminuir el gradiente de densidades de la capa de mezcla superficial.

En contraste durante períodos de menor radiación solar, los continentes se enfrían antes y menos intensamente que los océanos, lo cual disminuyen el gradiente de presión océano-continente, que debilita la intensidad de los vientos alisios y con ello los vientos del noroeste. Estos fenómenos generan un menor transporte de las aguas subárticas y una disminución de los procesos de surgencias y consecuentemente favorecen una mayor estratificación de la columna de agua.

A partir de la relación negativa entre la reconstrucción de la estratificación de la capa de mezcla en el sur del sistema de la Corriente de California y la reconstrucción de las anomalías de temperaturas en el HN, se puede decir que los gradientes de presión del HN y su control sobre la intensidad de los vientos del noroeste, sea probablemente otro factor importante que esté influyendo en la variabilidad oceanográfica del sistema de la Corriente de California para los últimos 400 años.

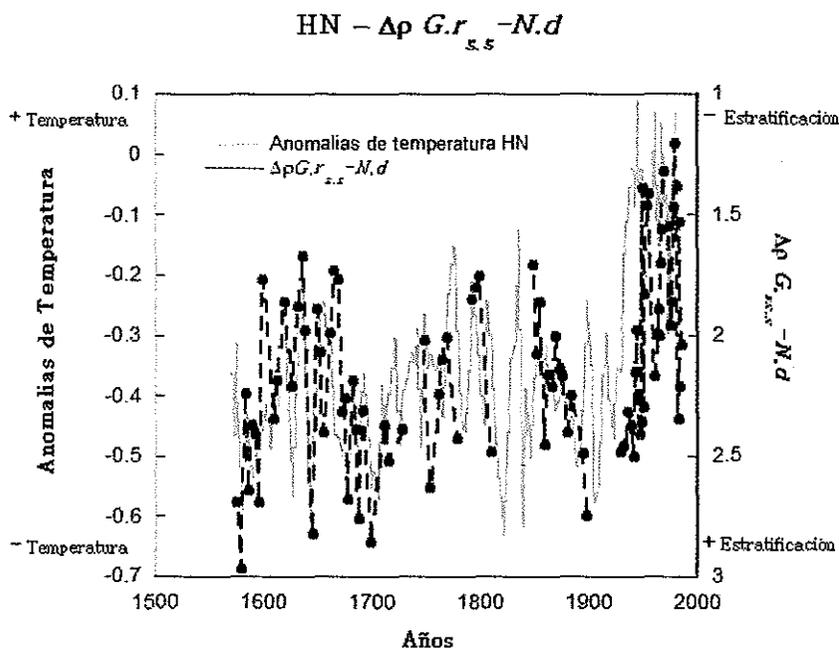


Figura 19. Reconstrucción de la estratificación de la capa de mezcla para los últimos 400 años a partir de la diferencia de densidad entre *G.ruber s.s* y *N.dutertrei* en el sur del sistema de la Corriente de California (línea discontinua azul, eje de las ordenadas de la derecha). Reconstrucción de las anomalías del Hemisferio Norte para los últimos 400 años (Mann 1998). (Línea continua amarilla, eje de las ordenadas de la izquierda).

VII.4.3 Comparación de la reconstrucción obtenida a partir del índice de la estratificación de la capa de mezcla que abarca los últimos 400 años en la cuenca de San Lázaro con una reconstrucción de las anomalías de presión en el ecuador a partir del Índice de la Oscilación Austral (ISA) reconstruida por Jones y Mann (2004)

La reconstrucción obtenida a partir del índice de la estratificación de la capa de mezcla que abarca los últimos 400 años en la cuenca de San Lázaro se comparó con una reconstrucción de las anomalías de presión en el Ecuador a partir del Índice de la Oscilación Austral (ISA) reconstruido por Jones y Mann (2004) a partir de registros de corales y de anillos de árboles en América del Norte (Figura 20).

En la figura 21 se observa cómo ambas reconstrucciones comparten la misma tendencia entre el siglo XVI y el presente hacia valores más positivos del ISO, que implican bien una mayor frecuencia o una mayor intensidad de los eventos de *La Niña*. En el sur del sistema de la Corriente de California se manifiesta como una disminución en el índice de estratificación de la capa de mezcla.

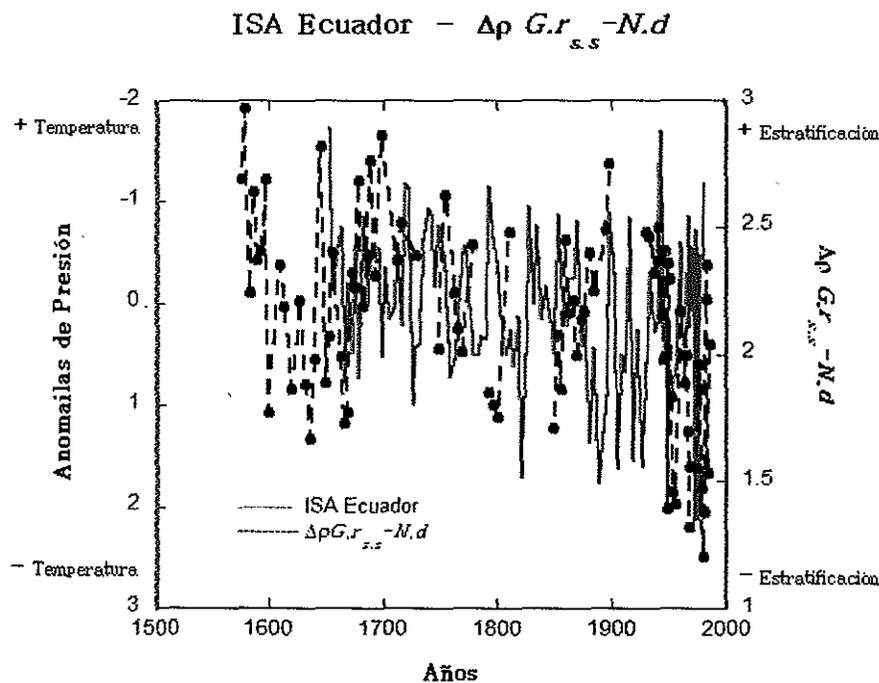


Figura 20. Reconstrucción de la estratificación de la columna de agua para los últimos 400 años a partir de la diferencia de densidad entre *G.ruber s.s* y *N.dutertrei* en el sur del sistema de la Corriente de California (línea discontinua azul, eje de ordenadas de la derecha) Reconstrucción de las anomalías de presión (SOI) en el Ecuador (Jones y Mann, 2004). (Línea continua naranja, eje de ordenadas de la izquierda).

## VIII. CONCLUSIONES

- La composición isotópica del oxígeno ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{FP}}$ ) de los foraminíferos plácticos es un buen índice del intervalo de su profundidad de calcificación en la columna de agua.
- La consistencia en el intervalo de la profundidad de calcificación de dos de las especies de foraminíferos implican una alta fidelidad estacional y en profundidad de estas tres especies.
- Las diferencias entre las composiciones isotópicas del oxígeno de *G. ruber s.s* y *N. dutertrei*  $\Delta\delta^{18}\text{O}_{\text{Gr-Nd}}$  nos permite elaborar un índice de la estratificación de la capa de mezcla en verano.
- La relación observada entre el índice de la variabilidad climática del Ecuador ENSO y la reconstrucción basada en las diferencias entre las composiciones isotópicas de *G. ruber s.s* y *N. dutertrei* ( $\Delta\delta^{18}\text{O}_{\text{Gr.s-Nd}}$ ) valida este índice como una herramienta para reconstruir la variabilidad oceanográfica interanual del sistema de la Corriente de California.
- La variabilidad del sistema de la Corriente de California obedece al menos a dos procesos océano-climáticos a escalas interanuales a decadales, por un lado a los gradientes de presión del hemisferio norte y por otro a la variación-océano climática en el Ecuador o a la interacción de estos.

## LITERATURA CITADA

- Bé, A. y W. Hutson. 1985. Ecology of planktonic foraminifera and biogeographic patterns of life and fossil assemblages in the Indian Ocean. *Micropaleontology*, 23: 369-414.
- Bemis, E. B., Spero, J. H., Bijma, J. y Lea, W. D. 1998. Reevaluation of the oxygen isotopic composition of planktonic foraminifera: Experimental results and revised paleotemperature equations. *Paleoceanography*, 13: 150-160.
- Berger, W. H. 1971. Sedimentation of planktonic foraminifera. *Marine Geology*, 11: 325-358.
- Bernal, F. G. 2001. Registro paleoceanográfico en los sedimentos laminados de la cuenca de La Paz, margen occidental del Bajo Golfo de California. Tesis de Doctorado en Ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, México, 101 pp.
- Castro, R., Mascarenhas, A. S., Durazo, R. y Collins, C. A. 200. Variación estacional de la temperatura y salinidad en la entrada del Golfo de California, México. *Ciencias Marinas*, 26: 561-583.
- Cepeda-Morales, J., Beier, E., Gaxiola-Castro, G., Lavín, M. F. y Godínez, V. M. 2009. Efecto de la zona del mínimo de oxígeno en el segundo máximo de clorofila en el Pacífico Oriental Tropical Mexicano. *Ciencias Marinas*, 35: 389-403
- Craig, H. y Gordon, L. 1965. Deuterium and oxygen-18 in the ocean and the marine atmosphere. *En: Tongiorgi, E. (ed) CNR Lab. Geol. Nucl. Pisa, Stable Isotopes in Oceanographic Studies and Paleotemperatures.. Spoleto, 9-130 p.*
- Curry, W. B. Thunell, R. C. y Honjo, S. 1983. Seasonal changes in the isotopic composition of planktonic foraminifera collected in Panama Basin sediment traps. *Earth and Planetary Science Letters*, 64: 33-43.
- Durazo, R. y Baumgartner, T. R. 2002. Evolution of oceanographic conditions off Baja California:1997-1999. *Progress in Oceanography.*, 54: 7-31.
- Durazo, R., Gaxiola-Castro, G., Lavaniegos, B., Castro-Valdez, R., Gomez-Valdes, J. y Mascarenhas, A. S. 2005. Oceanographic conditions west of the Baja California coast, 2002-2003: A weak El Niño and subarctic water enhancement. *Ciencias Marinas.*, 31: 537-552.
- Durazo, R. 2009. Climate and upper ocean variability off Baja California, Mexico: 1997-2008. *Progress in Oceanography*, doi 10.1016/j.pocean.2009.07.043.

- Emery, W. J. y Hamilton, K. 1985. Atmospheric forcing of interannual variability in the northeast Pacific Ocean: Connection with El Niño, *Journal Geophysical Research*, 90: 857-868.
- Emiliani, C. 1954. Depth habitats of some species of pelagic foraminifera as indicated by oxygen isotopic ratios. *American Journal of Science*, 252: 149-158.
- Esparza-Alvarez, M. A., Herguera, J. C. y Lange, C. 2007. Last century patterns of sea surface temperatures and diatom (>38  $\mu\text{m}$ ) variability in the Southern California current. *Marine Micropaleontology*. 64: 18-35.
- Epstein, S., Buchsbaum, H.A., Lowenstam, H.A. y Urey, H.C. 1953. Revised carbonate-water isotopic temperature scale. *Geological Society of America Bulletin*. 64: 1315-1326
- Fairbanks, R. G., Sverdrup, M., Free, R., Wiebe, P. H. Y Bé, A. 1982. Vertical distribution and isotopic fractionation of living planktonic foraminifera from the Panama Basin. *Nature*, 298: 841-844.
- Field, B. D. 2004. Variability in vertical distributions planktonic foraminiferal in the California Current. Relationships to vertical ocean structure. *Paleoceanography*, 19: PA2014.
- Flores, T. G. 2009. Registro palinológico en sedimentos laminados de la parte sur del Golfo de California y su relación con cambios paleoceanográficos y paleoclimáticos. Tesis de Doctorado en Ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California.
- Herguera, J.C., Bernal, G., Molina-Cruz, A., 2003. Decadal surface ocean variability in the lower Gulf of California: records for the past 300 years. *Geofísica Internacional* 42: 397-406.
- Hernández, B., Gaxiola-Castro, G., Alvarez-Borrego, S., Gómez-Valdés, J. y Nájera-Martínez, S. 2003. Interannual variability of new production in the southern region of the California Current. *Deep Sea Research II*, 50: 2423-2430.
- Hickey, B. M. 1979. The California Current System, hypotheses and facts. *Progress in Oceanography*, 8: 191-279.
- Hidalgo-Gonzales, M. R y Álvarez-Borrego, S. 2001. Chlorophyll profiles and the water column structure in the Gulf of California. *Oceanología Acta*, 24: 19-28.
- <http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/recons.html>, en <http://www.noaa.gov> (noviembre, 2011).

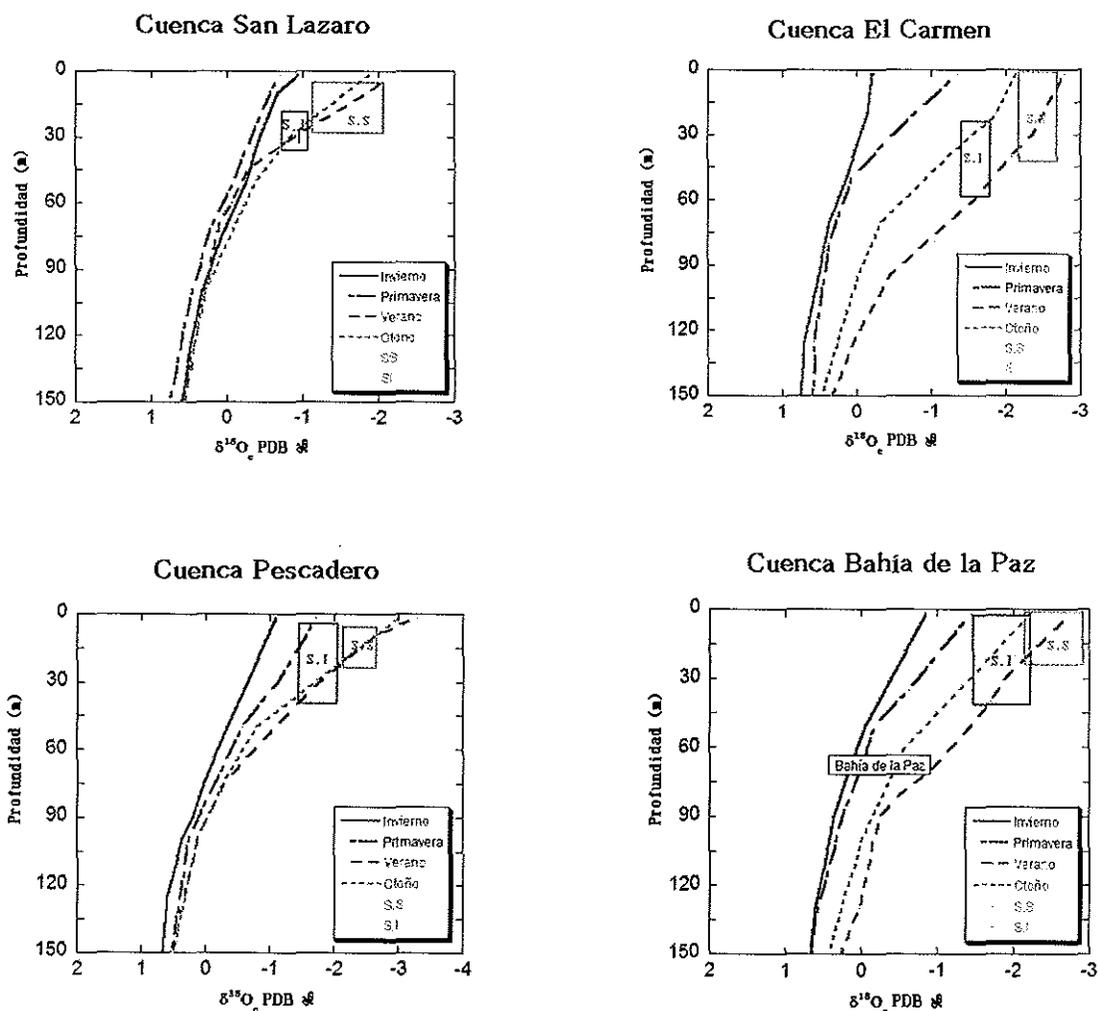
<http://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/enso/enso-links.php>, en <http://www.noaa.gov> (noviembre, 2011).

- Hut, G. 1987. Stable isotope reference samples for geochemical and hydrological investigations, Consultants Group Meeting, Report to the Director General, 42, International Atomic Energy Agency, Vienna.
- Jones, P. D. y Mann, M. E. 2004. Climate Over Past Millennia. *Reviews of Geophysics*, 42: RG2002
- Kemle-von, M. y Oberhänsli, H. 1999. The distribution of living planktic foraminifera in relation to southeast Atlantic oceanography. En *Use of Proxies in Paleoceanography: Examples from the South Atlantic*. Ed. G. Fisher, and G. Wefer. Springer, Berlin. 91-115 pp.
- Kroon, D., y Darling, K. 1995. Size and upwelling control of the stable isotope composition of *Neogloboquadrina dutertrei* (d'Orbigny), *Globigerinoides ruber* (d'Orbigny) and *Globigerina bulloides* d'Orbigny; examples from the Panama Basin and Arabian Sea. *The Journal of Foraminiferal Research*, 25: 39-52.
- Lavin, M. F., Berier, E y Badan, A. 1997. Estructura hidrográfica y circulación del Golfo de California: Escalas estacional e interanual. En: *Contribuciones a la Oceanografía Física en México*, Monografía No. 3, Unión Geofísica Mexicana. 139-169 pp.
- Lavin, M. F. y Marinone, S. G. 2003. An overview of the physical oceanography Of the Gulf of California, en *Nonlinear Processes en Geophysical Fluid Dynamics: (Eds) O. U. Velasco, J. Sheinbaum, y J. Ochoa*, Springer, New York. 173-204 pp.
- López, M. A., Cervantes, D. R., Reyes, A. S y Valdez, H. J. E. 2001. Cambio estacional de la Clorofila en la Bahía de la Paz B. C. S México *Hidrobiológica*, 21: 45-52.
- Lynn, R. y Simpson, J. 1987. The California Current System: The seasonal variability on interannual to century time scales. *Journal of Geophysical Research*. 92: 12.947-12.966.
- Mackas, D. L. 2005. Interdisciplinary oceanography of the western North American continental margin: Vancouver Island to the tip of Baja California. En: *The Sea (Eds) Robinson, A. R., H. B. Kenneth*. President and Fellows of Harvard College. 4: 442-494.
- Mann, M. E., Zhang, Z., Hughes, M. K., Bradley, R. S., Miller, S. K., Rutherford, S., Ni, F. 2008. Proxy-based reconstructions of hemispheric and global surface temperature

- variations over the past two millennia. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105: 13252-13257.
- Martinez-Lopez, A. 2004. Flujos de diatomeas y silicoflagelados en dos cuencas oceánicas del Sistema de la Corriente de California. Tesis de Doctorado en Ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. Ensenada, Baja California, México. 149 pp
- Ortiz, J. D., Mix, A. C. y Collier, R. W. 1995. Environmental control of living symbiotic and asymbiotic foraminifera of the California Current. *Paleoceanography*, 10: 987-1009.
- Pak, K. D. y Kennett, J. P. 2002. A foraminiferal isotopic proxy for upper water mass. *The Journal of Foraminiferal Research*, 32: 319-327.
- Parés-Sierra, A., y O'Brien, J. 1989. The seasonal and interannual variability of the California Current System: A numerical model. *Journal Geophysical research*, 94: 3159-3180.
- Parés Sierra, A., M. López., y E. Pavía. 1997. Oceanografía de Pacífico Nororiental. En: M. F. Lavín (ed). *Contribuciones a la oceanografía física en México. Monografía No. 3, Unión Geofísica Mexicana.* 1-24 pp.
- Percy, W.G., y Shoener, A. 1987. Changes in the marine biota coincident with the 1982-1983 El Niño in the northeastern subarctic Pacific Ocean, 92: 417-428.
- Ravelo, A. C., Fairbanks, R.G. 1992. Oxygen Isotopic Composition of Multiple Species of Planktonic Foraminifera: Recorders of the Modern Photoc Zone Temperature Gradient. *Paleoceanography*, 7: 815-831.
- Roden, G. I., Groves, G.W. 1959. Recent oceanographic investigations in the Gulf of California. *Journal Marine Research*, 18: 10-35.
- Sautter, L. R. y Thunell, R. C. 1991. Planktonic foraminiferal response to upwelling and seasonal hydrographic conditions; sediment trap results from San Pedro Basin, Southern California Bight. *Journal of Foraminiferal Research*. 21: 347-363.
- Simpson, J. J. 1983. Large-scale thermal anomalies in the California Current during the 1982-1983 El Niño. *Geophysical Research Letter*, 10: 937-940.
- Spero, H. J., Lea, W. D. 1996. Experimental determination of stable isotope variability in *Globigerina bulloides*: implications for paleoceanographic reconstructions. *Marine Micropaleontology*, 28: 231-246

- Thunell, R. C., Curry, H. B. y Honjo, S. 1983. Seasonal variation in the flux of planktonic foraminifera: time series sediment trap results from the Panama Basin. *Earth and Planetary Science Letters*, 64: 44-55
- Thunell R. C. 1998. Seasonal and annual variability in particle fluxes in the Gulf of California: A response to climate forcing. *Deep-Sea Research I*, 45: 2059–2083.
- Urey, H. C. 1947. The thermodynamic properties of isotopic substances. *Journal of the Chemical Society*, 562-581.
- Valdez-Holguin, J. M., Gaxiola, C. G y Cervante, D. R. 1995. Productividad primaria en el Golfo de California, a partir de la relación entre irradiancia superficial y clorofila de la zona eufótica. *Ciencias Marinas*, 21: 311-329.
- Valdez, D. S. 2010. Producción primaria fitoplanctónica en la región sur de la corriente de California durante julio de 2008. Tesis de Licenciatura. Universidad de Occidente, Unidad Guasave, Departamento de Ciencias Biológicas. Guasave, Sinaloa, México. 66 pp.
- Wefer, G., y Berger, W. H. 1991. Isotope paleontology: growth and composition of extant calcareous species. *Marine Geology*, 100: 207–248.
- Wit, J. C., Reichert, S. J., Jung, A., Kroon, D. 2010. Approaches to unravel seasonality in sea surface temperatures using paired single-specimen foraminiferal  $\delta^{18}\text{O}$  and Mg/Ca analyses. *Paleoceanography*, 27: 1-15.

**Apéndice 1.** Intervalos de la profundidad de calcificación de los morfotipos *Globigerinoides ruber s.l* y *Globigerinoides ruber s.S* en las cuatro localidades de estudio.



**Figura 21.** Intervalos de la profundidad de calcificación de *Globigerinoides ruber s.l* (cuadro azul) y *Globigerinoides ruber s.S* (cuadro malva). Las líneas representan los valores de  $\delta^{18}\text{O}_e$  calculado de la calcita en equilibrio para cada estación: línea continua roja, invierno; línea discontinua azul, primavera; línea discontinua verde, verano; línea discontinua malva, otoño. El eje de las ordenadas representa la profundidad (m) y el eje de las abscisas representa los valores de  $\delta^{18}\text{O}_e$  calculado.

**Apéndice 2.** Composición isotópica de *Globigerinoides ruber s.l* y *Globigerinoides ruber s.s.*

**Tabla IV.** Composición isotópica de *Globigerinoides ruber s.l* y *Globigerinoides ruber s.s.*

<b>Especie</b>	<b>Composición isotópica <math>\delta^{18}\text{O}</math></b>												
<i>G.ruber</i> <i>s.s</i>	-2.56	-2.40	-2.27	-2.53	-2.54	-2.35	-2.95	-2.29	-2.10	-2.48	-1.93	-1.90	-2.42
<i>G.ruber</i> <i>s.l</i>	-1.98	-1.79	-1.30	-1.71	-2.23	-2.12	-1.85	-1.89	-1.87	-1.85	-1.75	-1.29	-1.60