



Universidad Autónoma de Baja California

Instituto de Investigaciones Oceanológicas

Facultad de Ciencias Marinas



PROGRAMA DE DOCTORADO EN CIENCIAS EN OCEANOGRAFÍA COSTERA

**“FORAMINÍFEROS BENTÓNICOS COMO INDICADORES
DE LA ECOLOGÍA Y PALEOECOLOGÍA DEL DELTA DEL
RÍO COLORADO”**

Tesis que para obtener el Grado de Doctor en Ciencias en
Oceanografía Costera

Presenta:

Miguel Ángel Santa Rosa del Río

Ensenada, Baja California, Junio de 2013

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

PROGRAMA DE DOCTORADO EN CIENCIAS EN OCEANOGRAFÍA COSTERA


**FORAMINIFEROS BENTÓNICOS COMO INDICADORES DE LA ECOLOGÍA Y
PALEOECOLOGÍA DEL DELTA DEL RÍO COLORADO**

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTOR EN CIENCIAS


PRESENTA

Miguel Ángel Santa Rosa del Río

Aprobada por:



Dr. Guillermo Eliezer Avila Serrano
Director de Tesis



Dr. Miguel Agustín Téllez Duarte
Sinodal



Dr. Luis Antonio Cupul Magaña
Sinodal



Dr. Oscar González Yajimovich
Sinodal



Dr. Rafael Hernández Walls
Sinodal



Dedicatoria

A mi madre que siempre ha estado allí y que es mi ejemplo a seguir.

*A Karen que ha sido mi amiga, mi compañera, mi complemento,
gracias mi amor, porque sin ti esto no hubiera sido posible.*



Agradecimientos

Al Dr. Guillermo Avila Serrano “Memo”, por aceptar ser mi director, darme un espacio para trabajar, compartir sus conocimientos conmigo, estar disponible en todo momento para encaminar las ideas plasmadas en este escrito y sobre todo por brindarme el apoyo personal y profesional, muchas gracias por todo Memo.....

A mis sinodales Dr. Miguel Téllez, que sin sus atinados comentarios y observaciones no hubiera sido posible terminar este trabajo, Dr. Oscar González (Yaqui), por estar siempre disponible cuando surgía alguna duda, brindarme su apoyo y amistad, al Dr. Luis Cupul, que a pesar de estar siempre ocupado con otras comisiones, siempre tuvo tiempo para lo que necesitaba y Dr. Rafael Hernández Walls, que gracias a sus comentarios y dudas relacionadas con el tema me sirvió para hacer más entendible el escrito.

A todo el cuerpo de Geología: Memo, Jorge, Rigo, Ronald, Luis, Yaqui, Pancho, por abrirme las puertas del área de Geología, aceptarme y aguantarme durante todos estos años, en los que de una u otra forma siempre estuvieron allí para resolver las dudas que tenía.

Al Dr. Robert Douglas de la UCLA por su ayuda con la identificación de las especies de foraminíferos reportados en este trabajo.

A la Dra. Francisca Staines Urias por su valiosa ayuda con el análisis de Isotopos de Carbono, sus importantes comentarios ayudaron a concretar las ideas de ese capítulo.

A la M. en C. Hilham Palafox, que me apoyo en cada salida de campo y por amenizar las largas horas encerrados en la bodega de geología identificando foraminíferos bajo el microscopio.

Al Dr. Edgar Torres Irineo, que sin su ayuda en el análisis estadístico no me habría sido posible, interpretar mis resultados, muchas gracias Callo!!.

A “Conchita”, que no solo me brindó su apoyo en momentos difíciles, sino que me abrió las puertas de su casa, su amistad que sobrepasa por mucho lo que cualquier alumno esperaría tener de un maestro, y saber que independientemente de todo siempre podré contar con ella, muchas gracias por todo.....

A mis compañeros Caro, Rinah, Hiram, Mary, Georges, que más que compañeros de trabajo se convirtieron en amigos con quien platicar, convivir, reír, gracias chicos por su amistad.



A Erik, Cris, Estelita, que a pesar de la distancia siempre me apoyaron y confiaron en mí, y como olvidar a la pequeña *Xime*, por brindarme tanto cariño.

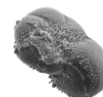
Al CONACyT por el financiamiento otorgado para realizar mis estudios de doctorado con registro 323036, beca 42245.

A la Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Ciencias Marinas por ser mi *alma mater*, por darme las bases que me han servido a lo largo de los años para obtener este logro.



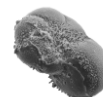
Resumen General

El estudio de los foraminíferos es de gran importancia tanto para la ecología como para la geología y la paleontología, debido a que son organismos muy sensibles a los cambios ambientales que ocurren en su entorno, como lo son: la temperatura, salinidad y concentraciones isotópicas (oxígeno y carbono). Dichos cambios se ven reflejados en la composición y abundancia de especies que conforman las comunidades tanto de la biocenosis como de la tanatocenosis. Debido al poco conocimiento que hay de la ecología y paleoecología de las comunidades de foraminíferos bentónicos en el Alto Golfo de California, el presente estudio se enfoca en un análisis de la diversidad, abundancia y variaciones isotópicas de las comunidades de foraminíferos bentónicos recientes en el Delta del Río Colorado, para lo que se trazaron cuatro transectos perpendiculares a la línea de costa, para un total de 16 puntos muestreo. Los muestreos se realizaron de forma estacional durante un ciclo anual: verano y otoño del 2009; invierno y primavera del 2010. Se tomaron muestras superficiales de sedimento a una profundidad de 4 a 14 metros, posteriormente en el laboratorio separar las comunidades (biocenosis y tanatocenosis), así como identificar las especies encontradas. Se tomaron submuestras de foraminíferos (10 testas), de cada comunidad, estación y temporada muestreada, con el objetivo de determinar la composición isotópica de oxígeno para cada muestra. Una vez concluidos los análisis de laboratorio se aplicaron diversas pruebas estadísticas para conocer la abundancia, diversidad, dominancia y equitatividad, las especies más abundantes fueron: *Ammonia beccarii parkinsoniana*, *Criboelphidium excavatum*, y *Rosalina* sp, donde *A. beccarii* fue la especie más dominante en todo el estudio tanto en las biocenosis como en las tanatocenosis. Con los datos de isótopos de oxígeno 18 y carbono 13 de la biocenosis se pudieron discriminar dos temporadas: (1) cálida y (2) fría, mientras que en la tanatocenosis no se presentó variación isotópica debida a los cambios en la salinidad o de temperatura existentes al momento del muestreo. Se puede concluir que los foraminíferos bentónicos son buenos indicadores de cambios en las condiciones ambientales que los rodean, ya que dichos cambios se reflejan directamente en la estructura poblacional así como en la composición isotópica de sus testas de carbonato de calcio.

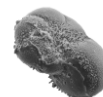


Índice General

Agradecimientos.....	4
Resumen General	6
Índice General.....	7
Índice de Figuras.....	9
Índice de Tablas.....	9
1. INTRODUCCIÓN	10
ANTECEDENTES	14
JUSTIFICACIÓN	16
HIPÓTESIS.....	17
OBJETIVOS	17
ÁREA DE ESTUDIO.....	18
Batimetría	19
Clima	19
2. Distribución y Abundancia de Tanatocenosis de Foraminíferos Bentónicos Submareales en el Delta del Río Colorado	21
Resumen	21
2. 1 Introducción.	22
2. 2 Objetivo.	23
2. 3 Material y Métodos.....	23
2. 4 Resultados y Discusión.....	26
2. 4.1 Composición de especies.....	28
2.4.2 Distribución y abundancia de especies.....	31
2.4.3 Riqueza, diversidad, equitatividad y dominancia.	34
2.5 Conclusiones.	36



3. Variaciones Isotópicas de Oxígeno ($\delta^{18}\text{O}$) en Foraminíferos Bentónicos, Bajo Condiciones Antiestuarinas en el Delta del Río Colorado	38
Resumen	38
3.1 Introducción	39
3.2 Material y Métodos.....	40
3.3 Resultados y Discusión.....	41
3.3.1 Composición y abundancia.....	41
3.3.2 Composición isotópica.....	42
3.4. Conclusiones	52
4. Distribución de Foraminíferos Recientes Bajo Condiciones Antiestuarinas en el Delta del Río Colorado.....	54
Resumen	54
4.1 Introducción	55
4.2 Resultados y Discusión.....	55
4.2.1 Composición de las especies	55
4.2.2. Estructura de las comunidades.....	66
4.3 Conclusiones	69
5. Composición isotópica de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) en Foraminíferos Bentónicos, en el Delta del Río Colorado	70
5.1 Resultados y Discusión.....	71
5.1.1 Biocenosis.....	71
5.1.2 Tanatocenosis	74
6. Conclusiones generales	78
7. LITERATURA CITADA.....	81
8. ANEXO.....	89



Índice de Figuras

Figura 1. Ubicación del área de estudio	18
Figura 2. Lanzamiento de draga tipo <i>Petite Ponar</i>	23
Figura 3. Muestras en tratamiento con Rosa de Bengala.	24
Figura 4. Juego de tamices para la separación de las fracciones de 63 a 180 μm	24
Figura 5. Vista ventral de las especies más abundantes en el delta del Río Colorado.....	29
Figura 6. Dendrogramas modo Q para las distintas temporadas del ciclo 2009 – 2010.	32
Figura 7. Abundancia de las especies dominantes del Alto Golfo de California.....	34
Figura 8. Dendrograma modo Q para los puntos de muestreo durante el ciclo 2009-2010.....	35
Figura 9. Rangos de variación de la composición Isotópica de oxígeno [$\delta^{18}\text{O}$].....	43
Figura 10. Distribución de la temperatura y composición isotópica de oxígeno [$\delta^{18}\text{O}$]	47
Figura 11. Distribución de la salinidad y composición isotópica de oxígeno [$\delta^{18}\text{O}$].....	48
Figura 12. Modelo de predicción entre la Temperatura y la [$\delta^{18}\text{O}$].....	49
Figura 13. Modelo de predicción entre la Salinidad y la [$\delta^{18}\text{O}$]	50
Figura 14. Dendrograma modo "R" para biocenosis	59
Figura 15. Efectos del refluo generado por los cambios de marea, en el delta del Río Colorado. .	60
Figura 16. Dendrograma modo "Q" para ambas comunidades durante el muestreo	65
Figura 17. Dendrograma de agrupamiento modo "R" para la Tanatocenosis	66
Figura 18. Relación de la abundancia entre ambas comunidades durante el ciclo de muestreo	66
Figura 19. Relación entre composiciones isotópicas de carbono para ambas comunidades.	72
Figura 20. Descarga de H_2O proveniente del Río Colorado al lado mexicano en Otoño 2009.	73
Figura 21. Distribución espacial de [$\delta^{13}\text{C}$] para biocenosis.	74
Figura 22. Distribución espacial de [$\delta^{13}\text{C}$] para tanatocenosis.	76

Índice de Tablas

Tabla I. Parámetros medidos durante el ciclo de muestreo	26
Tabla II. Listado de las especies de foraminíferos más abundantes en el ciclo 2009-2010.....	28
Tabla III. Listado de especies de foraminíferos aglutinados durante el ciclo 2009–2010.	30
Tabla IV. Índices estadísticos de diversidad, equitatividad y dominancia	34
Tabla V. Análisis de Varianza y prueba de Tukey para Biocenosis.	44
Tabla VI. Análisis de Varianza para Tanatocenosis.....	52
Tabla VII.- Listado de la abundancia total y relativa de los foraminíferos de la biocenosis.....	56
Tabla VIII.- Índices estadísticos de diversidad, equitatividad y dominancia.....	58
Tabla IX.- Listado de la abundancia total y relativa de los foraminíferos de la tanatocenosis.....	61
Tabla X. Comparación de la estructura poblacional entre ambas comunidades	68
Tabla XI. Análisis de Varianza y prueba de Tukey para biocenosis.....	72



1. INTRODUCCIÓN

Desde el inicio de las grandes civilizaciones, los deltas han jugado un papel importante en la historia de la humanidad, la existencia conjunta de tierras fértiles, agua y comunicaciones fluviales favorecieron el desarrollo de la agricultura y el comercio. Con el descubrimiento de nuevas fuentes de energía, el papel económico de los deltas se incrementó de manera importante, ya que estos normalmente se desarrollan en cuencas sedimentarias, las cuales favorecen el depósito, maduración y retención de hidrocarburos. Por esta razón, la importancia económica de los deltas impulsó su estudio geológico en los últimos 40 años, lo que ha permitido la mejor comprensión de los procesos sedimentarios y el arreglo estratigráfico de los depósitos correspondientes. Tienen una estructura sedimentaria compleja, presentan un ambiente intermedio entre la llanura fluvial y la costa, así mismo, se ven afectados por la influencia conjunta o escalonada del continente con las mareas y el oleaje, lo que puede llegar a provocar corrientes litorales capaces de modificar la línea de costa (Gilbert, 1985; 1990; Arche, 1992; Santa Rosa-del Río, 2008).

Los deltas se encuentran en las desembocaduras de los ríos en donde se van depositando los sedimentos arrastrados por la corriente, por lo regular abundan las marismas, las cuales son amplias extensiones de tierras bajas que sufren frecuentes inundaciones de agua proveniente del mar. Estos ecosistemas están considerados dentro de las zonas naturales más fértiles del mundo, con 800 a 2,000 gr. de C (CO₂)/m²/año (Arche, 1992).

El estudio de los foraminíferos es de gran importancia para la ecología, la geología y la paleontología debido a que se pueden relacionar sus formas antiguas con las del presente, además sus testas son muy sensibles a los cambios climáticos (Lipps et al, 1979), así mismo brindan información sobre el medio ambiente en el que se desarrollaron dependiendo de la morfología y composición isotópica de sus testas (Murray, 1991; Basak et al, 2009). Las testas de los foraminíferos se clasifican en: 1) **porcelánidas**, constituida por cristales de calcita elongados, orientados al azar y sobre éstos una delgada capa de cristales orientados tangencialmente (apariencia de porcelana); 2) **hialinas**, formadas por cristales de calcita de mayor tamaño, orientados perpendicularmente con respecto a la superficie de la concha (apariencia transparente); y 3) **aglutinadas**, creadas por granos de sedimento o detritus adherido por un cementante que segrega el organismo (Espinoza–Villegas, 1999).

La mayoría de los foraminíferos son especies bentónicas, aunque algunas se han sabido adaptar a la vida pelágica (planctónicos), representan una forma independiente de analizar los cambios en la ecología bentónica, ya que son cosmopolitas y se encuentran distribuidos



en la tercera parte del fondo oceánico. Son organismos unicelulares, existen desde el Cámbrico, preferentemente se localizan en el medio marino y solamente algunas formas ocurren en aguas salobres (Bignot, 1988). Presentan rizópodos, razón por la cual se han clasificado en el subphylum Sarcodina y Superclase Rhizopoda, su tamaño varía desde 20 micras hasta 2 centímetros (Hickman, 1990). Viven “arrastrándose” lentamente en el fondo marino, adheridos al sustrato de forma epifaunal o infaunal. Se distribuyen principalmente a lo largo de la plataforma insular y continental (Bandy, 1967). El cuerpo frágil de los foraminíferos está recubierto por un caparazón o concha llamada testa, que puede ser de origen calcáreo u orgánico. La mayoría de las testas constan de numerosas cámaras y presentan orificios por los cuales salen los pseudópodos con los que capturan su alimento (Hickman, 1990).

Los foraminíferos calcáreos (porcelánidos e hialinos), por lo general son de aguas cálidas (zonas tropicales) y de ambientes costeros (Hickman, 1990), no se encuentran en marismas ni en ríos debido a la condición ambiental inestable, con salinidades variables (de normal a hipersalina) y al bajo pH que disuelve las testas (Bandy, 1967). Los porcelánidos están asociados con ambientes someros (bahías, lagunas, y otras zonas costeras internas), donde existe la mayor disponibilidad de CaCO_3 (Greiner, 1970). Gran parte de este tipo de foraminíferos pertenecen a la familia *Miliolidae*, que por lo general ocupan más de la mitad de su población, además decrecen rápidamente hacia mar adentro, donde aumentan las formas hialinas (Bandy, 1967).

Las formas hialinas en su gran mayoría se clasifican con la familia *Rotalidae*, presentan un amplio rango de distribución, ocurren principalmente en la porción media de la plataforma donde las concentraciones de CaCO_3 son intermedias, encontrándose en zonas de temperatura y salinidades intermedias (Correa-Montero, 1997; Espinosa-Villegas, 1999).

Los aglutinados generalmente incrementan con la profundidad y conforme disminuye la disponibilidad de CaCO_3 , donde la temperatura y la salinidad son bajas, sin embargo algunas especies también pueden encontrarse en ambientes costeros (Correa-Montero, 1997; Espinosa-Villegas, 1999). En general, los que poseen un interior con cámaras complejas (alveolar, laberínticas o vesiculares), se restringen a zonas batiales, y en algunos casos a la zona nerítica externa; mientras que los que presentan una composición interna sencilla su distribución es más amplia, encontrándose comúnmente en ambientes estuarinos (Bandy, 1967).



Los foraminíferos más comunes de las lagunas costeras son cosmopolitas. La mayoría de las formas dominantes existen desde el Mioceno y presentan homomorfismos hasta el reciente. El género *Ammonia* es de los más dominantes, representa de 70% a 80% del total de la población, seguido por *Criboelphidium* y algunas formas aglutinadas (Bandy, 1967). Con lo que respecta a la salinidad en estas zonas es muy variable, al igual que en otras zonas costeras como lo son las bahías y estuarios, además de que cambian por temporada y de lugar en lugar. En dichas zonas, el pH se mantiene en un intervalo de 7.6 a 8.6 aproximadamente (Emery y Stevenson 1957, citado en Bandy, 1967).

Como ya se ha mencionado, las testas de estos organismos son sensibles a las variaciones oceanográficas de su entorno, las cuales quedan registradas en sus testas. En dichas testas se reflejan las variaciones isotópicas del oxígeno y el carbono principalmente. El oxígeno posee un peso molecular de 16.9994 con tres isótopos: $\delta^{16}\text{O}$, $\delta^{17}\text{O}$ y $\delta^{18}\text{O}$ en las proporciones 1.00000, 1.6277, 1.112531, respectivamente (Radelli, 1997). En el océano se encuentran primordialmente los isótopos $\delta^{16}\text{O}$ y $\delta^{18}\text{O}$, donde la abundancia depende principalmente de la temperatura, ya que al evaporarse el agua, se lleva consigo el isótopo más ligero ($\delta^{16}\text{O}$), el cual es característico por presentar valores más negativos con respecto a la relación $\delta^{16}\text{O}$ y $\delta^{18}\text{O}$. La fijación de estos isótopos se registran durante todo el crecimiento del organismo, es decir, desde el momento en que se forma la testa y hasta el momento en el que el foraminífero muere, cualquier cambio en la composición isotópica de su alrededor queda registrado en la testa. Esto nos permite tomar como índice la razón de $\delta^{18}\text{O}/\delta^{16}\text{O}$, también expresada como $\delta^{18}\text{O}$, que son indicadores de evaporación o aporte de agua dulce, ya que esta última es isotópicamente más ligera. El método se basa principalmente en el hecho de que en aguas cálidas hay un predominio de isótopos pesados ($\delta^{18}\text{O}$), mientras que en aguas frías ocurre lo contrario. Estos isótopos pesados son caracterizados por valores menos negativos de oxígeno, considerando que los valores negativos de isótopos de oxígeno conforme se tornan menos negativos (cerca al cero) serían indicios de condiciones marinas, mientras que en el caso contrario, al volverse más negativos (más alejados del cero), indicaría condiciones de aporte de agua dulce.

En el caso de los ambientes costeros, el $\delta^{18}\text{O}$ puede dar valores más negativos a los esperados, debido a los aportes de agua dulce, como se ha encontrado y reportado por Rodríguez et al (2001) en las conchas de moluscos de la zona del delta del Río Colorado, lo cual se debe a que el aporte de agua dulce es isotópicamente más ligera al haber pasado por varios ciclos de evaporación, condensación y precipitación (Téllez-Duarte y Avila-Serrano, 2001).



Es por lo anterior, que los foraminíferos son buenos indicadores de las condiciones ambientales ya que se puede inferir las condiciones climáticas y oceanográficas reflejadas en la composición isotópica de sus testas. Con lo cual en esta investigación se llevó a cabo un estudio de los cambios espaciales y temporales en la composición y estructura de las comunidades de foraminíferos con respecto al entorno ambiental, partiendo de la base paleoecológica para inferir la estructura y composición del bentos antes de la intervención humana, debido a que no se monitoreó el proceso de modificación de las diferentes comunidades bentónicas. Para lo cual se utilizarán las comunidades de foraminíferos bentónicos para inferir las variables ambientales tales como temperatura, salinidad y composición isotópica, contrastado con la biodiversidad actual.



ANTECEDENTES

La cuenca de drenaje del Río Colorado comprende un área aproximada de 630,000 km², recorre aproximadamente 1,600 km desde su nacimiento en Colorado, E.U., hasta su desembocadura en el Golfo de California (Thompson, 1968).

En la desembocadura del río, las aguas se enriquecían con el abundante material en suspensión rico en nutrientes, dando lugar a una alta productividad bentónica, como lo evidencian los millones de conchas que originan cordilleras o *cheniers* localizados a lo largo de la costa de Baja California (Thompson, 1968, Kowalewsky et al., 2000). Con la construcción de las presas *Hoover* en febrero de 1935 y *Glen Canyon* en marzo del 1963, se logró el control definitivo de las aguas del Río Colorado, ocasionando que actualmente el delta se encuentre en un proceso de erosión (Van Andel, 1964; Baba et al., 1991; Carriquiry y Sánchez, 1999). El impacto ecológico más severo fue la transformación radical en la hidrología de la zona deltaica, de estuarina a antiestuarina (Carbajal et al., 1997; Lavín et al., 1997). La consecuencia de esto son las fuertes corrientes de marea y la concentración de partículas bioclásticas depositadas como grandes acumulaciones de conchas de moluscos formadoras de islas de barrera (Thompson, 1968, Kowalewsky et al., 1994). Sin embargo, a pesar de los largos periodos de ausencia de agua dulce, el delta del Río Colorado es un área de reproducción y cría de especies económicamente importantes, como el camarón (*Litopenaeus* sp.) y la corvina del golfo (*Cynoscion othonepterus*), lo que hace que esta región tenga una alta actividad pesquera. Además, es el hábitat de especies consideradas en peligro de extinción, como la totoaba (*Totoaba macdonaldi*) y la vaquita marina (*Phocoena sinus*) (Santamaría-del Ángel et al., 1994; Rojas-Bracho, 1998). Posterior a 1935, los años en que se ha liberado una gran cantidad de agua dulce hacia el delta fueron: 1980, de 1983 a 1987 y en 1993 (Álvarez-Borrego, 1999), años en los que se pudieron realizar investigaciones para conocer cómo se encontraba el área deltaica en condiciones de flujo del Río Colorado.

La comparación entre asociaciones de organismos vivos (biocenosis) y organismos muertos (tanatocenosis), han mostrado un empobrecimiento de la diversidad total y el reemplazo de especies antes dominantes, como es el caso del bivalvo estuarino intermareal *Mulinia coloradoensis*, que domina en los *cheniers* e indica que la productividad de esta especie era bastante alta. Además las evidencias indican que antes del control de las aguas del Río Colorado el efecto de las aguas diluidas influía en las comunidades bentónicas hasta la latitud de San Felipe, B.C. (Fig. 1) donde actualmente *M. coloradoensis* se encuentra extinta (Kowalewsky et al., 2000; Avila-Serrano, 2006).



Pocos estudios documentan la influencia del agua dulce en el delta del Río Colorado, y éstos se han restringido a la zona intermareal (Téllez-Duarte et al., 2006; Avila-Serrano, 2006; Huerta-Tamayo, 2007). Sin embargo, la influencia del agua dulce en la distribución y abundancia de estos organismos ha sido bien estudiada en otras localidades, como en la desembocadura del Río Mississippi (Thomas y Simmons, 1960), y el Río Guadalupe en Texas (Phleger y Lankford, 1957; Phleger, 1964). En general, la alta productividad de foraminíferos bentónicos se atribuye al enriquecimiento de nutrientes transportados en los sedimentos del agua descargada por los ríos, y las surgencias en algunas zonas costeras (Haq y Boersma, 1978).

La influencia del agua dulce en ecosistemas costeros puede ser inferida con base a la composición isotópica de oxígeno $\delta^{18}\text{O}$ en conchas de invertebrados marinos (Flessa et al., 1997; Ruvalcaba, 2005; Téllez-Duarte et al., 2006; Huerta-Tamayo, 2007). En ambientes estuarinos las conchas de carbonato de calcio y su composición isotópica $\delta^{18}\text{O}$ está controlada primariamente por la temperatura del agua, y en segundo término por las diferencias isotópicas entre el agua dulce y marina, las cuales pueden ser utilizadas para estimar la contribución del agua dulce en áreas estuarinas (Andreasson et al., 1999). En un estudio realizado por Grossman y Ku (1986), proponen que una variación de 1‰ en la concentración isotópica de oxígeno, corresponde a un incremento de la temperatura de 4.7°C, con lo cual establecen una curva de calibración en la variación de la concentración isotópica debida exclusivamente a los cambios en la temperatura del agua de mar. Donde conociendo la concentración isotópica de conchas se podría calcular la temperatura a la que se encontraba el organismo al momento de la muerte.



JUSTIFICACIÓN

Debido a los pocos trabajos realizados en el área deltaica relacionados con la microfauna así como a los pocos datos registrados, el presente trabajo pretende hacer un diagnóstico de la diversidad biológica con base a un estudio comparativo de la biocenosis y tanatocenosis de foraminíferos bentónicos submareales. Dicho diagnóstico podría ser utilizado como base para la toma de decisiones sobre el manejo de la Reserva de la Biósfera del Alto Golfo de California y delta del Río Colorado ya que al comprender los cambios ambientales que han ocurrido en la zona deltaica a causa de la intervención antropogénica, se podrían crear programas de restauración, repoblamiento, o incluso proponer el área como sitio de interés eco-turístico. Se optó por esta zona por ser, de acuerdo a Lavín y Sánchez (1998), donde existía la mayor influencia de agua de dicho río durante flujos extraordinarios.

Por lo anterior es importante conocer la importancia de los microorganismos marinos, mismos que actualmente son de gran ayuda para la comunidad científica ya que permiten comprender las características ambientales del área deltaica en épocas anteriores. Por tal motivo, es de gran importancia contar con un amplio archivo de datos relacionados con las comunidades bentónicas así como de otras especies que habiten en la zona, ya que si comparamos los datos de las comunidades que habitaban en la zona en años anteriores y los comparamos con los que actualmente viven allí, es posible determinar la situación en la que se encuentren las comunidades, al igual que se podría conocer la causa o causas por las cuales han migrado o incluso hasta extinguido algunas especies, conociendo estas causas se puede establecer un marco de referencia del cual partir para poder mejorar o implementar nuevas medidas de protección al área deltaica.



HIPÓTESIS

La concentración isotópica de oxígeno ($\delta^{18}\text{O}$) de las comunidades de biocenosis de los foraminíferos bentónicos submareales, deberán mostrar diferencias significativas con valores isotópicos menos negativos con respecto a las comunidades de tanatocenosis. Las cuales deberán de registrar las condiciones cuando el flujo de agua proveniente del Río Colorado llegaba hasta el delta, reflejadas en valores más negativos. Estas variaciones isotópicas de oxígeno deberán ser influenciadas únicamente por efectos de la temperatura y la salinidad, dado que actualmente no existen aportes fluviales por parte de dicho río.

OBJETIVOS

Realizar un diagnóstico de las variaciones en la diversidad ecológica de los foraminíferos del Alto Golfo de California, comparando los cambios espaciales y temporales en la composición de las biocenosis y tanatocenosis de foraminíferos bentónicos submareales durante un ciclo anual.

Determinar si existe un promediado temporal activo en las comunidades de foraminíferos bentónicos del Delta del Río Colorado.

Obtener los rangos de variación de la composición de isótopos de oxígeno para las testas de los foraminíferos submareales.

Determinar si existe influencia de agua dulce mediante el análisis de isótopos de oxígeno entre las tanatocenosis y la biocenosis.



ÁREA DE ESTUDIO

El Alto Golfo de California, es un área triangular de 5,000 km² comprendida entre los límites de una línea imaginaria entre San Felipe, Punta Borrascoso y la antigua desembocadura del Río Colorado (Álvarez-Borrego et al, 1975; Godínez-Sandoval, 1997; Lavín et al, 1997). Se encuentran grandes extensiones de planicies bajas en ambas costas, así como las Islas Montague y Pelicano, localizadas en la desembocadura del Río Colorado (Galindo-Bect, 2003).

El área estudiada se localiza dentro de la zona núcleo del Delta del Río Colorado, entre los 31° 15' y 31° 50' de latitud norte y los 114° 39' y 115° 05' de longitud oeste (Fig. 1). Este estudio es específicamente en la zona submareal adyacente a la costa de Baja California, donde el único aporte significativo de agua dulce es el proveniente del Río Colorado.

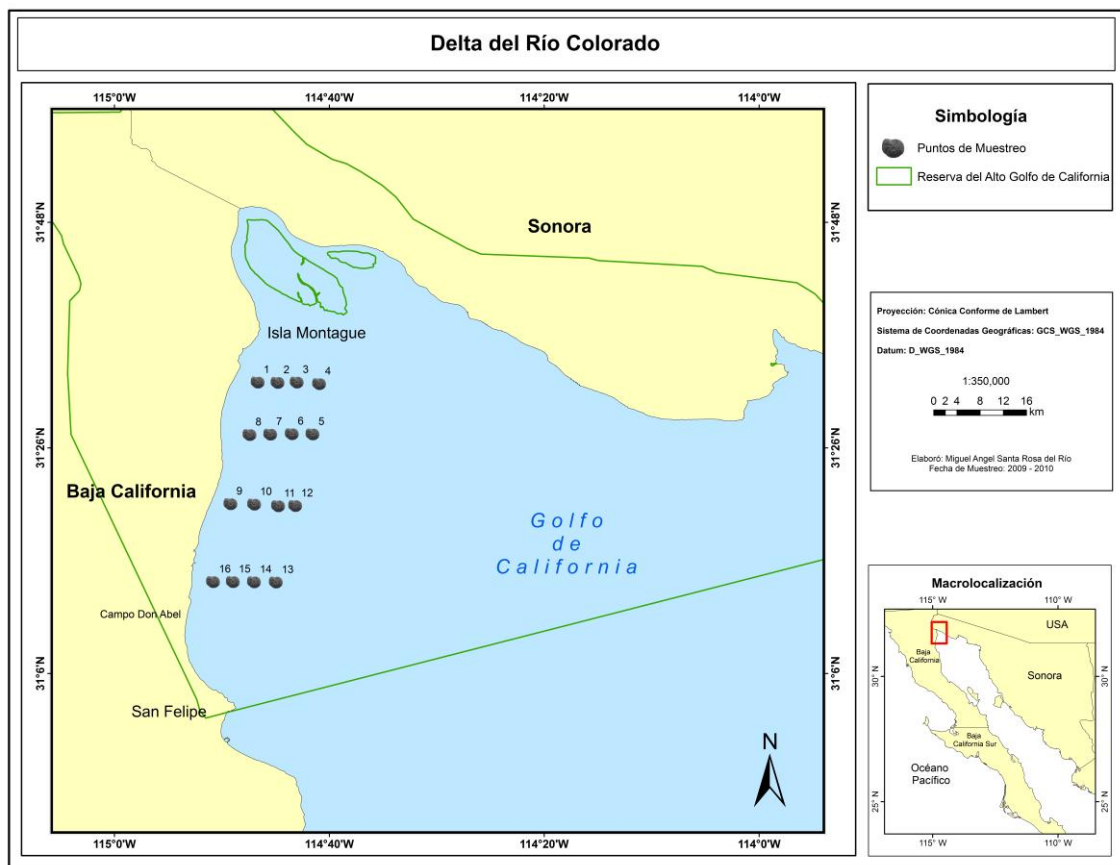


Figura 1. Ubicación del área de estudio, donde se indican las 16 estaciones de muestreo, realizados en cada temporada y delimitación del área natural protegida de la Reserva de la Biosfera del Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado.



Batimetría

La batimetría del Alto Golfo de California es irregular caracterizada por canales bajos paralelos a la línea de costa, los cuales forman barras de marea elongada que se extienden desde la boca del Río Colorado hasta 50 km al sudeste. Presenta profundidades no mayores a 30 m con un promedio de 15 m (Thompson, 1969; Meckel, 1975; Cupul-Magaña, 1994).

Gran parte del área del Alto Golfo de California, sobre todo la que se encuentra del lado a la península, se caracteriza por una planicie de sedimentos donde la profundidad aumenta gradualmente hacia la cuenca Wagner. A diferencia de la parte correspondiente al área de las costas de Sonora, los cambios son abruptos de forma que se puede evidenciar claramente la presencia de un canal (Thompson, 1969; Galindo-Bect, 2003).

Clima

La temperatura del aire oscila entre 14°C y 34°C la mayor parte del año, mientras que en el verano puede alcanzar valores por encima de los 40°C (Roden, 1964; Miranda - Reyes et al, 1990) y en las planicies de marea van de 33°C a 40.6°C (Goodwin *et al*, 2001). Se aprecian dos estaciones climáticas bien marcadas, debido a que durante el invierno la temperatura del aire entre el Golfo y la costa del Océano Pacífico son pequeñas, mientras que en el verano las diferencias pueden exceder hasta los 10°C (Mosiño y García, 1974).

Presenta una media anual de lluvia de 68 mm (Miranda Reyes et al, 1990), la estimación de la evaporación en promedio es de 1.1 m año⁻¹ (Lavín et al, 1998). La salinidad presenta rangos que se encuentran entre 35‰ y 40‰ (Roden, 1964; Rodríguez et al, 2001).

Los vientos presentan principalmente dos componentes estacionales, una proveniente del noroeste en invierno con magnitudes que van de 8 a 12 m s⁻¹ y en el verano procedente del sudeste, con una magnitud de 2 a 5 m s⁻¹ (Lavín et al, 1997).

El flujo neto anual promedio de calor atmósfera-agua es hacia el agua, Lavín y Organisita (1988), mencionaron que para el Alto Golfo de California son 69 W m⁻² cerca de la costa y 83 W m⁻² fuera de ella, sin embargo, en estudios más recientes como los realizados por Castro et al (1994), mencionan que el flujo neto medio anual de calor para el Golfo Norte es de 121 W m⁻². Esto sugiere que para evitar una acumulación de calor en el Alto Golfo de California, se requiere una circulación termohalina Norte-Sur y Sur-Norte, donde el Alto Golfo y el Golfo Norte exporten calor y sal hacia el Sur, por otro lado indica que debe existir un flujo en la circulación termohalina del fondo hacia el Norte. Esto tiene importantes implicaciones



ecológicas, ya que al fluir el agua hacia el Norte, la circulación termohalina en el Golfo Norte se convierte en un mecanismo natural de fertilización para el Alto Golfo de California debido a que el flujo de agua profunda proviene con alto contenido de nutrientes inorgánicos que fluyen hacia la superficie (Álvarez-Borrego, 2001; Galindo-Bect, 2003).



2. Distribución y Abundancia de Tanatocenosis de Foraminíferos Bentónicos Submareales en el Delta del Río Colorado

Resumen

Los foraminíferos bentónicos son indicadores importantes de las condiciones ambientales costeras y marinas por ser muy sensibles a los cambios que ocurren en su entorno, los cuales se reflejan con la presencia y abundancia de especies en las comunidades de tanatocenosis. El objetivo de este trabajo es comparar los cambios espaciales y temporales en la composición y estructura de las comunidades de tanatocenosis de foraminíferos bentónicos en el Alto Golfo de California. Se realizaron cuatro muestreos estacionales (verano, otoño e invierno del 2009, y primavera del 2010), de sedimento en cuatro transectos perpendiculares a la línea de costa (56 muestras), en la zona submareal adyacente a Baja California, entre campo Don Abel y la parte Sur de Isla Montague. Para diferenciar la Biocenosis de la Tanatocenosis, las muestras fueron teñidas con Rosa de Bengala. Se trataron en laboratorio por tamizado en húmedo con el fin de eliminar limo y arcilla; fue retenida la fracción entre 63 y 180 μm para su análisis, y se separaron 300 individuos por muestra. Se identificaron taxonómicamente y se calculó la abundancia relativa, para determinar las especies dominantes. Los datos fueron procesados mediante un análisis de agrupamiento en modo Q y R además, se calculó el índice de diversidad de Shannon–Weaver y la dominancia por el índice de Simpson. Por último se realizó un mapa de distribución. Los géneros más abundantes fueron: *Ammonia*, *Criboelphidium*, y *Rosalina*; estos representan preferentemente condiciones marinas, lo que muestra cambio en el Alto Golfo de California. También aparecieron en todas las estaciones de muestreo cuatro géneros de foraminíferos aglutinados: *Ammoscalaria*, *Reophax*, *Anomaloides* y *Nouria*, pero su distribución se centra principalmente en las estaciones más al sur del área de estudio, en los límites del antiguo estuario al norte de San Felipe.



2.1 Introducción.

Los foraminíferos bentónicos son otra forma de analizar los cambios en la ecología bentónica, ya que se encuentran distribuidos casi en la tercera parte del fondo oceánico, así como en la zona adyacente a la costa. Son organismos unicelulares que existen desde el Cámbrico y que preferentemente se localizan en el medio marino aunque algunas formas ocurren en aguas salobres (Bignot, 1988).

En el Alto Golfo de California, donde se localiza el Delta del Río Colorado, es un excelente sitio para investigar el impacto antropogénico sobre las comunidades de foraminíferos y otros organismos, debido a que es considerado como un laboratorio natural donde han ocurrido cambios ambientales dramáticos en los últimos 100 años por la desaparición del antiguo estuario (Huerta–Tamayo, 2007).

Con la construcción de las presas *Hoover* y *Glenn Canyon*, se controlaron definitivamente las aguas del Río Colorado, lo que actualmente ocasiona que el Delta se encuentre en un proceso de erosión (Van Andel, 1964; Baba *et al.*, 1991; Carriquiry y Sánchez, 1999). Aun cuando ésta se explica por causas antropogénicas, también han ocurrido procesos erosivos naturales por las fluctuaciones del río que ocasionaron la desviación de sus descargas de agua y aporte de sedimentos hacia cuencas adyacentes como el mar de Salton (Thompson, 1968).

El impacto ecológico más severo fue por consecuencia del cambio en la hidrología de la zona deltaica que propició se transformara de un sistema estuarino a un antiestuarino (Carbajal *et al.*, 1997; Lavín *et al.*, 1998; Avila-Serrano *et al.*, 2006).

Es importante el entender los procesos erosivos que ocurren actualmente en el Delta, para lo cual existen herramientas como lo es el análisis del promediado temporal, el cual se basa principalmente en el estudio de diversas generaciones a través del tiempo, las cuales se ven expuestas a los procesos erosivos ocasionados por la hidrodinámica de la zona. Walker y Bambach (1971), definen el concepto de promediado temporal como: “La acumulación de comunidades vivas locales durante un tiempo requerido para depositar el contenido en el sedimento”. Por lo anteriormente comentado y debido a que no se tiene información de las comunidades de foraminíferos bentónicos en la zona submareal antes de las modificaciones al cauce del Río Colorado, es importante generar nueva información que sirva como un marco de referencia comparativo para la utilización de estos datos con fines de entender lo que sucede actualmente en el área deltaica.



2. 2 Objetivo.

Comparar los cambios espaciales y temporales en la estructura de las comunidades de tanatocenosis de foraminíferos bentónicos submareales en el Delta del Río Colorado, con el fin de determinar si existe un promediado temporal activo de las mismas.

2. 3 Material y Métodos.

Se realizaron cuatro transectos perpendiculares a la línea de costa con un total de 16 estaciones, cada una se georeferenció con un Sistema de Posicionamiento Global (GPS por sus siglas en inglés) marca Garmin e-Trex. Para el muestreo de sedimentos superficiales se utilizó una draga tipo “*Petite Ponar*” con capacidad de 2.4 L. (Fig. 2), la cual se lanzó de una embarcación (lancha tipo paceña de 22”). De la draga se obtuvieron submuestras mediante una pala de campo con la que se colectó 100 gr de sedimento aproximadamente, los cuales se vaciaron en una bolsa de plástico y fijaron con alcohol al 60% para su procesamiento posterior en laboratorio.



Figura 2. Lanzamiento de draga tipo *Petite Ponar*, de la embarcación.

En el laboratorio las muestras se tiñeron con Rosa de Bengala (Fig. 3), siguiendo el método descrito por Walton (1952), para diferenciar las biocenosis de las tanatocenosis. Después de un periodo de 48 horas se tamizó en húmedo con una luz de malla de 62 μm para eliminar limo y arcilla. Las testas de foraminíferos se concentraron por filtración a través de un papel Whatman número 4 con diámetro de 11 cm, y se secaron en un horno a temperatura controlada de 40°C. Posteriormente se tamizó la muestra y se separaron las fracciones entre 63 y 180 μm (Fig. 4), por ser donde se concentran mayormente las testas de foraminíferos. Finalmente, se separaron 300 individuos por muestra para su identificación



considerando que Lipps et al, (1979) mencionan que este es el tamaño mínimo de muestra para obtener datos cuantitativos confiables en estudios de diversidad.



Figura 3. Muestras en tratamiento con Rosa de Bengala.



Figura 4. Juego de tamices para la separación de las fracciones de 63 a 180 μm .

Una vez identificados y contabilizados los foraminíferos, con los datos se construyó una matriz de 40 casos y 16 variables que fueron procesados mediante un análisis multivariado de agrupamiento en modo “Q” y “R”, para comparar las variaciones temporales de la tanatocenosis representados en dendrogramas basados en distancias Euclidianas con encadenamiento completo. Cuando estas distancias son pequeñas indican un alto grado de asociación entre cada una de las variables (Bakus, 2007). Dichos dendrogramas permiten valorar cuál o cuáles son los transectos con mayor similitud con base al número de individuos identificados por muestra.

El análisis de agrupamiento modo “Q” nos indica la variabilidad estacional, es decir, cómo cambia la distribución de la tanatocenosis de los foraminíferos a lo largo y ancho de la zona de estudio. Mientras que el modo “R” indica la variabilidad temporal durante las cuatro estaciones del año (20090–2010).



Se hicieron los análisis necesarios para determinar los diferentes índices ecológicos con los programas *Statistica* versión 7, *Excel*, *Primer* versión 5. Estos fueron:

Diversidad de Shannon-Weaver (H'). Definido como:

$$H' = - \sum_{i=1}^S p_i \log_2 p_i \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde S es el número de especies por muestra, y p_i es la proporción de organismos de la especie respecto al total de organismos (abundancia relativa). Este índice estima la biodiversidad de una población con respecto al número de individuos de cada especie que la conforma.

La equitatividad de Pielou (J'), definida como:

$$J = H' / H'_{max} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde H' corresponde al valor de diversidad esperado y H'_{max} al valor de diversidad máximo. Este índice describe qué tan uniforme es el sistema en base al modelo hipotético, donde todos los taxones tienen las mismas posibilidades de abundancia. El valor alto indica uniformidad mientras que el bajo indica, de manera indirecta, que existe dominancia por parte de una(s) especie(s).

También se calculó el índice de dominancia de Simpson ($1-\lambda' = D$), se define como:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^S n_i(n_i - 1)}{N(N - 1)} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde S es el número de especies, N es el total de organismos presentes y n es el número de ejemplares por especie. Este índice indica cuál o cuáles son las especies dominantes en la población, es decir, cuál es la que está conformada con el mayor número de individuos de una misma especie.

Todas las especies identificadas se documentaron por medio de un microscopio electrónico de barrido (Anexo I), marca JEOL, modelo JSM-35C propiedad de la División de Ciencias de la Tierra del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada



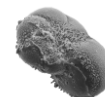
(CICESE). Finalmente fueron depositados en la bodega de paleontología de la Facultad de Ciencias Marinas de la UABC.

2. 4 Resultados y Discusión.

Debido a problemas logísticos y climáticos solo durante la temporada de verano se muestrearon dos de los cuatro transectos que se tenían contemplados (transecto II y III; Fig. 1), en las siguientes temporadas si se completaron todos los transectos. Las fechas de los muestreos se realizaron en el siguiente orden: 22 de agosto (verano) y 13 de noviembre (otoño) del 2009; 20 de marzo (invierno) y 18 de junio (primavera) del 2010. Las temperaturas a lo largo del ciclo oscilaron entre los 20 y 31°C con un rango de salinidad de entre 34 y 49‰ (Tabla I).

Tabla I. Parámetros medidos durante el ciclo de muestreo

Puntos de muestreo	Salinidad (‰)	Temperatura (°C)	Profundidad (m)	[$\delta^{18}\text{O}$] en Biocenosis	[$\delta^{18}\text{O}$] en Tanatocenosis	[$\delta^{13}\text{C}$] en Biocenosis	[$\delta^{13}\text{C}$] en Tanatocenosis
Verano E5	36	31	13	-1.63	-1.11	-1.51	-1.26
Verano E6	38	30	12.3	ND	-1.50	ND	ND
Verano E7	38	31	10.6	1.30	ND	-2.45	-1.65
Verano E8	37	30.5	10.4	ND	-2.45	-2.42	-1.65
Verano E9	35	31	14.4	4.18	-1.30	-2.01	-1.24
Verano E10	37	30.5	11.9	ND	ND	ND	ND
Verano E11	38	31	9.2	3.89	-1.42	-2.06	-1.32
Verano E12	38	30.5	6.8	ND	ND	ND	ND
Otoño E1	45	21	11.9	-1.45	-1.59	-1.55	-1.68
Otoño E2	40	22	10.6	4.65	-1.68	-2.26	-1.96
Otoño E3	46	21	8.4	3.49	-1.34	-2.22	-1.31
Otoño E4	49	20	7.3	ND	-1.05	-2.50	-1.90
Otoño E5	40	22	13	0.78	-2.30	-1.57	-1.69
Otoño E6	42	22	12.3	1.97	-1.56	-1.95	-1.90
Otoño E7	40	22	10.6	ND	-1.80	-2.95	-1.75
Otoño E8	47	22	10.4	5.94	-2.01	-2.33	-1.62
Otoño E9	42	22	14.4	5.68	-1.93	-2.41	-1.38
Otoño E10	40	22	11.9	ND	ND	ND	ND



Continuación Tabla I. Parámetros medidos durante el ciclo de muestreo

Puntos de muestreo	Salinidad (‰)	Temperatura (°C)	Profundidad (m)	[$\delta^{18}\text{O}$] en Biocenosis	[$\delta^{18}\text{O}$] en Tanatocenosis	[$\delta^{13}\text{C}$] en Biocenosis	[$\delta^{13}\text{C}$] en Tanatocenosis
Otoño E11	42	23	9.2	1.69	-2.20	-1.80	-1.49
Otoño E12	42	22	6.8	2.95	-1.99	-2.05	-1.59
Otoño E13	44	22	10.7	ND	ND	-1.99	ND
Otoño E14	40	22	9.1	5.27	-2.02	-2.38	-1.62
Otoño E15	42	22	6.7	ND	ND	-3.09	ND
Otoño E16	44	22	4.1	ND	ND	-3.45	ND
Invierno E1	38	21	11.9	-1.48	-1.50	-2.07	-1.75
Invierno E2	38	20	10.6	-0.82	-1.80	-1.67	-2.00
Invierno E3	36	20.5	8.4	ND	ND	ND	ND
Invierno E4	36	20.5	7.3	-1.3	-1.75	-1.68	-1.69
Invierno E5	36	20	13	-1.34	-2.03	-1.81	-1.75
Invierno E6	38	20.5	12.3	-1.83	-1.93	-1.66	-1.70
Invierno E7	36	21	10.6	-1.48	-1.24	-1.79	-1.63
Invierno E8	36	22	10.4	ND	ND	ND	ND
Invierno E9	37	21	14.4	-1.85	-1.74	-1.35	-1.30
Invierno E10	36	21	11.9	-2.15	-2.45	-1.44	-1.79
Invierno E11	37	21	9.2	-1.84	-2.23	-1.34	-1.52
Invierno E12	37	20	6.8	-1.44	-1.47	-1.4	-1.45
Invierno E13	36	21	10.7	ND	ND	ND	ND
Invierno E14	37	21	9.1	-1.62	-2.03	-1.05	-1.49
Invierno E15	37	21	6.7	-1.15	-1.37	-1.35	-1.24
Invierno E16	37	20.5	4.1	-1.64	-1.81	-1.51	-1.70
Primavera E1	35	29	11.9	-0.47	-2.06	-1.54	-1.53
Primavera E2	36	29	10.6	-1.12	-1.00	-1.71	-2.33
Primavera E3	36	30	8.4	-0.47	-1.37	-1.82	-1.36
Primavera E4	39	30	7.3	-1.56	ND	-2.58	ND
Primavera E5	36	28	13	ND	ND	ND	ND
Primavera E6	35	29	12.3	-1.15	-1.77	-1.65	-1.84
Primavera E7	35	29	10.6	-0.87	-1.87	-2.01	-2.04
Primavera E8	35	29	10.4	-1.22	ND	-1.48	ND
Primavera E9	35	28	14.4	ND	ND	ND	ND
Primavera E10	35	28	11.9	-1.89	-1.72	-1.55	-1.56
Primavera E11	36	29	9.2	-1.56	-1.64	-1.43	-1.12
Primavera E12	35	28	6.8	-1.97	-2.14	-1.58	-1.62
Primavera E13	35	27.5	10.7	-0.67	-0.96	-1.32	-0.99
Primavera E14	35	28	9.1	ND	ND	-1.08	ND
Primavera E15	34	28	6.7	-1.44	-1.40	-1.45	-1.24
Primavera E16	35	28.5	4.1	-0.56	ND	-1.56	ND



2. 4.1 Composición de especies.

En las 56 muestras analizadas se identificaron 40 especies (ver Anexo) de las cuales 32 fueron a nivel especie y ocho a nivel de género. La fauna se caracterizó por una baja diversidad: 95% del total de individuos lo constituyeron 15 especies (Tabla II), de las cuales tres: *Ammonia beccarii parkinsoniana*, *Rosalina* sp1, y *Criboelphidium excavatum* comprendieron el 58% del total de especies (Fig. 5). *A. beccarii parkinsoniana* fue la especie más abundante, presente en 55 de las 56 muestras analizadas; es una especie euritópica, euritérmica y principalmente abunda en ambientes hipersalinos, lo cual concuerda con el actual estado antiestuarino del Delta del Río Colorado (Murray 1991; Walton y Sloan, 1990; Devenay et al., 1998; Avila-Serrano et al., 2006). La segunda especie más abundante fue *C. excavatum*, esta especie es común en ambientes estuarinos (Murray 1991), por lo que dada su abundancia muy probablemente sean poblaciones acumuladas durante el predominio de las condiciones estuarinas. *Rosalina* sp 1 fue la tercer especie dominante, se distribuye primordialmente en océano abierto aunque también llega a zonas lagunares pero con menos frecuencia (Phleger, 1960). Por lo anterior, su abundancia se explica por las condiciones actuales de la parte sur del Delta, pero no para las condiciones hipersalinas de la parte norte.

Tabla II. Listado de las especies de foraminíferos más abundantes encontradas en el ciclo 2009 – 2010.

Especie	Abundancia Relativa en Tanatocenosis (%)	Número de individuos	Abundancia Relativa en Biocenosis (%)	Número de individuos
<i>Ammonia beccarii parkinsoniana</i> (d'Orbigny, 1826)	28.19	5,653	64.5	676
<i>Criboelphidium excavatum</i> (Terquem, 1876)	15.99	3,206	21.6	226
<i>Rosalina</i> sp (d'Orbigny, 1826)	14.22	2,851	2.3	24
<i>Buccella tenerrima</i> (Bandy, 1950)	6.47	1,297	2.4	25
<i>Criboelphidium spinatum</i> var. <i>translucens</i> (Cushman and Brönnimann 1948)	6.36	1,276	X	X
<i>Ammonia</i> sp (Linné, 1758)	6.13	1,230	X	X
<i>Criboelphidium gunteri</i> (Cushman and Brönnimann 1948)	4.58	919	X	X
<i>Criboelphidium incertum</i> (Cushman and Brönnimann 1948)	3.99	800	X	X



Continuación Tabla II. Listado de las especies de foraminíferos más abundantes encontradas en el ciclo 2009 – 2010.

Especie	Abundancia Relativa en Tanatocenosis (%)	Número de individuos	Abundancia Relativa en Biocenosis (%)	Número de individuos
<i>Criboelphidium poeyanum</i> (Cushman and Brönnimann 1948)	2.21	443	X	X
<i>Quinqueloculina sp 1</i> (d'Orbigny, 1826)	2.09	420	2.3	24
<i>Bolivina</i> (d'Orbigny, 1839)	X	X	1.1	12
<i>Bulimina marginata</i> (d'Orbigny, 1826)	1.37	274	1.7	18
<i>Quinqueloculina sp 3</i> (d'Orbigny, 1826)	1.12	224	X	X
<i>Nouria</i> (Heron-Allen y Earland, 1914)	X	X	1.6	17
<i>Quinqueloculina sp 2</i> (d'Orbigny, 1826)	1.08	217	X	X
<i>Miliolinella</i> (Wiesner, 1931)	X	X	0.8	8
<i>Buliminella elegantissima</i> (d'Orbigny, 1826)	1.02	205	0.7	7
<i>Pseudomasselina</i> (Lacroix, 1938)	X	X	0.5	5
<i>Fissurina</i> (Reuss, 1850)	X	X	0.3	3
<i>Reusella</i> (Galloway, 1933)	X	X	0.3	3
<i>Ammoscalaria pseudospiralis</i> (Williamson, 1858)	0.76	152	X	X

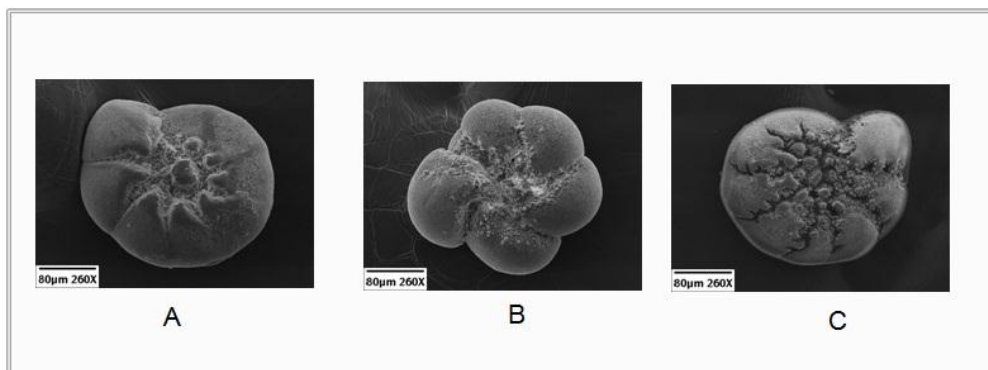


Figura 5. Vista ventral de las especies más abundantes en el delta del Río Colorado; A) *Ammonia beccarii parkinsoniana*; B) *Criboelphidium excavatum*; C) *Rosalina* sp 1. (Escala a 80µm a un zoom óptico de 260 X).

Los géneros más diversos en todo el ciclo fueron *Criboelphidium* y *Quinqueloculina*. Del primero, cinco de las especies están en el 95% del total de individuos; y del segundo (*Quinqueloculina*) con tres especies dentro del 15% de las más abundantes (Tabla II); éste género sugiere condiciones hipersalinas de acuerdo a Murray (1973), quien asocia la presencia de Miliolidos con ambientes de alta salinidad como actualmente ocurre en el Alto Golfo de California. En el caso particular de *Criboelphidium*, se caracteriza por habitar en



ambientes lagunares con pastos marinos (Murray, 1991). La ocurrencia conjunta de ambos géneros se puede explicar como resultado del transporte y promediado temporal: por un lado, las amplias praderas del pasto marino *Dystichilis palmeri* en la zona costera y cercanas a la Isla Montague, constituyen el hábitat ideal de *Cribrorhynchium* sp bajo las condiciones actuales del Delta; y por otro, la presencia de estos organismos hasta la parte Sur de la zona de muestreo donde actualmente no existen condiciones hipersalinas coincide con la extensión del antiguo estuario del Delta del Río Colorado, (Lavín y Sánchez, 1998; Huerta-Tamayo, 2007).

El género *Ammonia* se caracterizó por ser el de mayor número de individuos tanto en cada estación del año como en cada transecto muestreado, además de estar dentro de las especies más abundantes del ciclo (Tabla II). Esta especie se caracteriza por tener una amplia de distribución geográfica, así como vivir preferentemente en aguas someras y ambientes con salinidades altas (Murray 1991; Walton y Sloan, 1990; Devenay et al., 1998). Por tanto es compatible con las condiciones salinas actúales.

Se identificaron cuatro géneros de foraminíferos aglutinados: *Ammoscalaria*, *Reophax*, *Anomaloides* y *Nouria* (Tabla II), representados por cinco especies, de las cuales la más abundante es *Ammoscalaria pseudospiralis* con un 53%, por otra parte *Reophax dentaliformis* sólo con el 5% de abundancia (Tabla III). La presencia de foraminíferos aglutinados en el área de estudio, indica el antiguo aporte fluvial, ya que las aguas dulces con un pH más ácido inhibían la calcificación, por lo que los mejor adaptados eran los aglutinados, mientras que las testas calcáreas dominan en aguas más alcalinas (Bernal et al., 2008 en Palafox-Silva, 2011).

Tabla III. Listado de especies de foraminíferos aglutinados durante el ciclo 2009 – 2010.

Espece	% Verano	% Otoño	% Invierno	% Primavera	% Abundancia
<i>Ammoscalaria pseudospiralis</i>	65	50	76	41	53
<i>Nouria sp</i>	7	38	2	36	26
<i>Anomaloides sp</i>	5	10	16	9	10
<i>Reophax nanus</i>	21	0	1	6	6
<i>Reophax dentaliformis</i>	2	0	6	8	5



2.4.2 Distribución y abundancia de especies

Se representa la asociación de abundancias de foraminíferos en las diferentes temporadas del año en forma de dendrogramas (Fig. 6), donde se observa que todos los muestreos se caracterizaron por la presencia de dos grupos dominantes. Sin embargo, las temporadas de verano y primavera responden a un patrón de asociación central y sesgado hacia la costa, mientras que en otoño e invierno la distribución es más homogénea a lo largo y ancho del área estudiada. Esto lo explica seguramente las condiciones climáticas presentes en las temporadas muestreadas, debido a los giros estacionales que se presentan en el Alto Golfo de California, que de acuerdo a lo reportado por Lavín et al (1997), a lo largo del año en esta zona se presentan dos tipos de giros, siendo un giro ciclónico durante el verano y un giro anticiclónico durante el invierno. Estos giros aunado a las condiciones físicas que se presentan en el Alto Golfo de California, podría influenciar en las distribuciones de las comunidades de foraminíferos bentónicos en la zona estudiada.

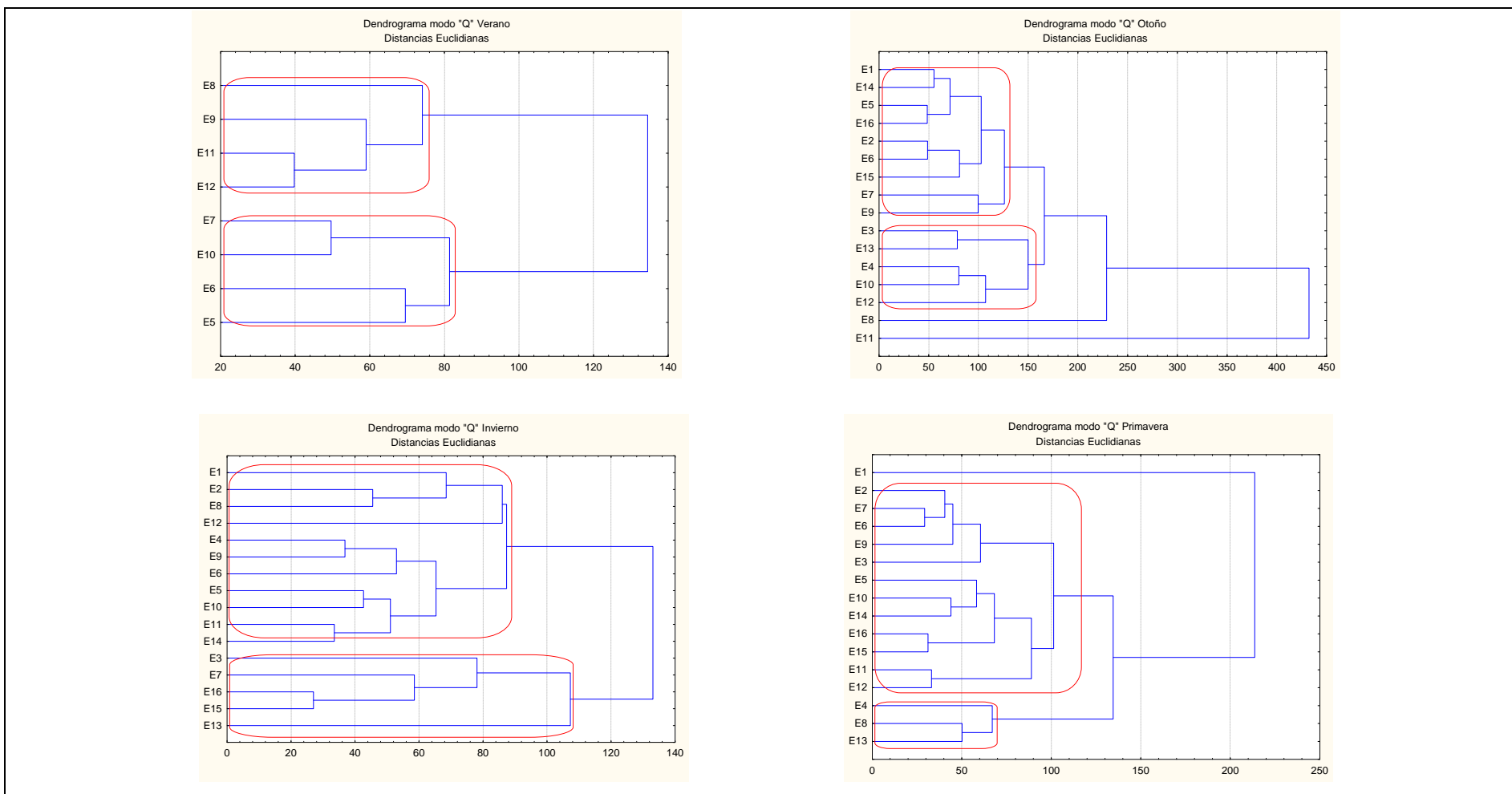


Figura 6. Dendrogramas modo Q para las distintas temporadas del ciclo 2009 – 2010.



Con base a las especies más abundantes se realizó un mapa donde se representa la abundancia relativa de cada especie en la zona deltaica (Fig. 7). De acuerdo al número de individuos presentes en cada estación, se observa la asociación que hay entre las tres especies dominantes, donde *Ammonia* está presente en todas las estaciones de muestreo con el mayor número de individuos, tanto en cada una de las estaciones muestreadas, como en cada temporada. Es una especie euriótica por lo tanto es normal encontrarla en estas latitudes; nerítica que ciertamente corresponde a las profundidades en las que fueron colectadas las muestras de sedimento (Tabla I), y por último indica condiciones hipersalinas, que debido al nulo aporte de agua dulce por parte del Río Colorado y al alto grado de evaporación que se registra en el Alto Golfo de California, concuerda claramente con la abundancia de este género. Usera y Blázquez (1998), reportan que las condiciones óptimas para el crecimiento de *Ammonia* se encuentran en un rango de temperatura entre 24 y 30°C, salinidad de 20‰ a 40‰ con picos máximos de 50‰, estos datos se correlacionan con los observados en el área deltaica durante los muestreos, ya que se obtuvieron valores promedio de temperatura de 26°C y salinidades de hasta 49‰. Cabe aclarar que cuando la temperatura y salinidad queda por encima de lo reportado por estos autores, al menos en lo que se refiere a este género, el crecimiento se detiene y puede llegar a la muerte del organismo.

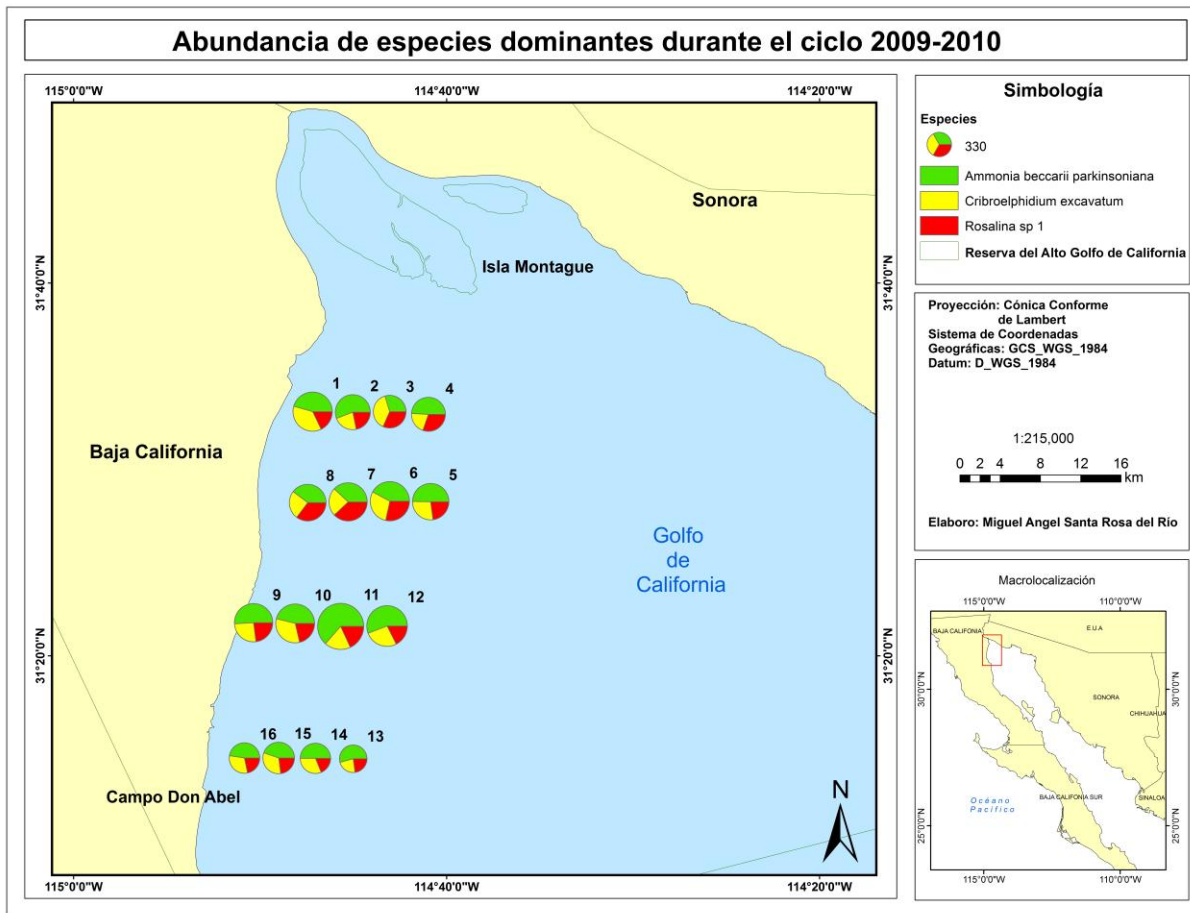


Figura 7. Abundancia de las especies dominantes del Alto Golfo de California. En cada gráfica se muestra la abundancia de cada especie (*Ammonia beccarii parkinsoniana*, *Cribroelphidium excavatum*, *Rosalina* sp 1).

2.4.3 Riqueza, diversidad, equitatividad y dominancia.

La riqueza de especies fue mayor en primavera con 37 y el verano presentó la menor con 34, mientras que la mayor abundancia se presentó en el otoño (Tabla IV).

Tabla IV. Índices estadísticos de diversidad, equitatividad y dominancia

Periodo	Riqueza (S)	Número total de individuos (N)	Equitatividad de Pielou (J')	Índice de diversidad Shannon-Wiener H'(Log2)	Índice de dominancia de Simpson (1-λ')
Primavera	37	5,351	0.6	3.4	0.9
Verano	34	2,792	0.7	3.4	0.9
Otoño	35	6,655	0.7	3.3	0.8
Invierno	35	5,253	0.6	3.2	0.8
Ciclo 2009-2010	40	20,051	0.6	3.4	0.9



Así mismo, las temporadas con mayor similitud en abundancia, fueron en primavera e invierno (Fig. 7). Esto probablemente se deba a que el reclutamiento ocurre en esta temporada, Jorissen et al (1999), mencionan que para el Alto Golfo de California en la temporada de otoño se presenta un pulso reproductivo asociado a un afloramiento de fitoplancton, por lo tanto probablemente este aumento en la abundancia podría responder a estos reclutamientos. Como se mencionó anteriormente, el muestreo de verano fue el que menor número de individuos presentó debido a problemas de logística.

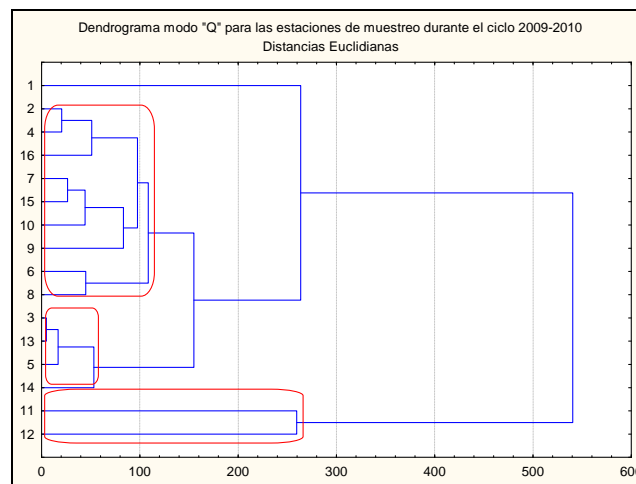


Figura 8. Diagrama de agrupamiento modo Q para los puntos de muestreo durante el ciclo 2009-2010.

Los índices estadísticos de diversidad (H'), equitatividad (J'), y dominancia (D), se muestran en la tabla IV. El primero presentó valores durante todo el ciclo entre 3.4 y 3.2, en primavera y verano están los valores más altos y en invierno fue el más bajo. Esto se relaciona con lo comentado anteriormente, en cuanto a la abundancia de especies en temporadas cálidas y se debe al reclutamiento presentado en dichas temporadas que es ocasionado por los afloramientos de fitoplancton (Jorissen et al, 1999).

Con respecto a la equitatividad mostró poca variación (0.6 y 0.7), donde los valores más altos fueron en verano y otoño, mientras que primavera e invierno son las temporadas con los más bajos. Esto indica que la comunidad se encuentra distribuida de manera homogénea en toda el área de estudio, debido a que la mayor abundancia de individuos se compone de un número muy reducido de especies.

Para el caso de la dominancia (D), se puede ver que pocas especies son dominantes. En primavera y verano fue la mayor (0.9), mientras que otoño e invierno tiene los valores más



bajos (0.8). Sobresale *A. beccarii parkinsoniana* como la especie más dominante que es cosmopolita, euritámica, euritópica y eurihalina, y a pesar de ser principalmente de ambiente oceánico (mar abierto), también se encuentra en ambientes estuarinos. Usera y Blázquez (1998), reportan que dicha especie responde a dos estrategias de reproducción: 1) **k**, es cuando se encuentra en ambientes estables como el oceánico, y dada las características ambientales tienden a tener un tamaño corporal grande (formas macrosféricas), baja reproducción, (prole poco numerosa), y comunidades constantes sin muchos cambios, con una baja mortalidad; y 2) **r**, es cuando se encuentra en zonas inestables como lagunares y estuarinas, en este caso la reproducción es rápida (prole muy numerosa), el tamaño corporal es más pequeño (formas microsféricas) y presentan una alta mortalidad. Lo que se puede observar en nuestro estudio con el aumento de la abundancia y dominancia de *A. beccarii parkinsoniana*, es que presentó un comportamiento de estrategia “r”, al ser organismos de pequeño tamaño y al aumento de la densidad de individuos, a su vez en cuanto a sus formas macrosféricas se presentó con mayor abundancia en comparación con las formas microsféricas. El aumento de dichas formas puede estar relacionado con un ambiente próximo al óptimo para el crecimiento y desarrollo de esta especie (Usera y Blázquez, 1998).

2.5 Conclusiones.

- La especie más abundante fue *A. beccarii parkinsoniana*; y el aglutinado más abundante *A. pseudospiralis* con la mayor ocurrencia en el invierno.
- Los géneros más diversos fueron *Criboelphidium* y *Quinqueloculina*, con 6 especies cada uno.
- Existe poca equitatividad en el área de estudio debido a que la mayor abundancia de individuos se compone de un número muy reducido de especies.
- De acuerdo con el índice de dominancia de Simpson, las tres especies dominantes fueron: *A. beccarii parkinsoniana*, *C. excavatum* y *Rosalina* sp1.
- La mayor abundancia de organismos se presentó en el otoño, mientras que primavera e invierno fueron las temporadas con mayor similitud en cuanto al número de individuos colectados.



-
- Primavera y verano presentaron un patrón de distribución central y sesgado hacia la costa, pero otoño e invierno su distribución fue más uniforme a lo largo y ancho del área de estudio.



3. Variaciones Isotópicas de Oxígeno ($\delta^{18}\text{O}$) en Foraminíferos Bentónicos, Bajo Condiciones Antiestuarinas en el Delta del Río Colorado

Resumen

Los foraminíferos bentónicos son excelentes indicadores ambientales, sus testas hechas CaCO_3 registran la concentración isotópica del entorno, que sirve para analizar cambios ambientales ocurridos durante un tiempo determinado. Los isótopos estables, en especial de oxígeno ($\delta^{18}\text{O}$), son útiles para interpretar ambientes antiguos, ya que se usan como “proxy” de variables ambientales (temperatura y salinidad). El objetivo de este trabajo es proporcionar rangos de variación isotópica de las comunidades de foraminíferos bentónicos del delta del Río Colorado. Se realizaron cuatro campañas de muestreo en un año (2009-2010) en la zona submareal adyacente de Baja California. Se trazó cuatro transectos perpendiculares a la línea de costa, y cada uno tiene cuatro estaciones; se obtuvo en ellas: sedimento, salinidad y temperatura *in situ*. En laboratorio se separaron 300 individuos por muestra; se tomó submuestras para el análisis isotópico. Los datos se trataron con los programas R 2.12.2; PAST 1.81 y ArcMap 9.3. Se identificó 40 especies en Tanatocenosis y 13 en Biocenosis, las más abundantes en ambas comunidades son los géneros *Ammonia* y *Cibicides*. En Biocenosis el rango de variación isotópica fue -2.15 a 5.94‰ con intervalo de temperatura de 11°C e indica condiciones antiestuarinas; en la Tanatocenosis fue de -3.04 a -0.74, es indicio de condiciones estuarinas previas al represo.



3.1 Introducción

El impacto ecológico más notable como consecuencia de la ausencia de aporte de agua dulce es la radical transformación del antiguo estuario en antiestuario como lo mencionan en sus trabajos Carbajal et al. (1997) y Lavín et al. (1997), reportan que anteriormente existía un gradiente de salinidad de 12 a 34‰, y actualmente esta llega a valores de hasta 36.8‰ (Carbajal et al, 1997). Por su parte Carriquiry y Sánchez (1999), que estudiaron los sedimentos del delta del Río Colorado, confirman con estudios previos y análisis por ellos realizados de metales pesados en los sedimentos del delta, la condición antiestuarina del antiguo estuario del delta del Río Colorado. Dichas condiciones antiestuarinas son más acentuadas hoy día, ya que los valores pueden elevarse hasta 49‰ (Santa Rosa-del Río et al, 2011). Como consecuencia del deterioro ambiental varias especies de flora y fauna se encuentran seriamente amenazadas o en peligro de extinción, como es el caso de la totoaba (*Totoaba macdonaldi*), la vaquita marina (*Phocoena sinus*), el palmoreador de Yuma (*Rallus longirostris yumanensis*), entre las más relevantes. La almeja del delta (*Mulinia coloradoensis*) es la que más dramáticamente permite visualizar la magnitud del impacto (Kowalewsky et al., 2000; Avila-Serrano, 2001; Rodríguez et al, 2001), ya que actualmente solo existen pequeñas poblaciones en las proximidades de la desembocadura del río, cuando en el pasado reciente abundaba en toda el área deltaica (Téllez-Duarte et al, 2008a).

El uso de isótopos estables, en especial de isótopos de oxígeno ($\delta^{18}\text{O}$), ha sido muy útil para caracterizar e interpretar ambientes antiguos, ya que permite utilizarlos como proxy de variables ambientales como la temperatura y salinidad. (Grossman y Ku, 1986). Estudios previos en conchas de moluscos estuarinos del delta del Colorado han demostrado que con base a los rangos de $\delta^{18}\text{O}$, inferidos por la comparación de una concha actual y una antigua, a mayor cantidad de agua dulce que entra en la zona de mezcla los valores de $\delta^{18}\text{O}$ tienden a ser menores a -2.5‰; y ocurre lo contrario al disminuir esta agua, son más positivos los valores a menor dilución de agua dulce y condiciones más marinas (Rodríguez et al., 2001). Esto también se ha observado en el bivalvo *Protothaca grata* en registros arqueológicos prehistóricos (Téllez-Duarte et al, 2008b), quienes encontraron en un conchero ubicado en el límite sur del delta del Río Colorado, aproximadamente a 65 km de su desembocadura, valores entre -3.44‰ y -3.99 ‰, lo que indica condiciones estuarinas.

Una forma independiente de analizar los cambios en la ecología bentónica es a través de los foraminíferos bentónicos. Al distribirse casi en la tercera parte del fondo oceánico



incluyendo la zona costera adyacente, y construir testas de carbonato de calcio que fijan en equilibrio con las condiciones fisicoquímicas del agua circundante, permite reconstruir las condiciones ambientales en que vivieron. Otra ventaja es que son sensibles a los cambios ambientales, además de que se requiere de un tamaño de muestra pequeño para estudiarlos (Téllez-Duarte, comunicación personal).

Poco se conoce de la ecología de foraminíferos bentónicos en el Alto Golfo de California. Entre los trabajos que se han realizado encontramos a Barbieri (1996), quién estudió los foraminíferos del intermareal, encontrando una baja diversidad y similitud en las asociaciones entre organismos presentes y fósiles, lo que daba un indicio de condiciones ambientales similares.

Ruvalcaba-Baroni (2005), encontró que la composición isotópica en testas de foraminíferos fósiles indican condiciones estuarinas notablemente más pronunciadas durante el Pleistoceno hasta donde actualmente se encuentran los límites del delta.

Huerta-Tamayo (2007), comparó la composición isotópica de biocenosis y tanatocenosis, encontró que en estas últimas existe una persistente señal isotópica de la presencia de agua dulce en el área deltaica debido al promediado temporal.

Los estudios anteriores se han restringido a la zona intermareal, por lo que se desconoce la composición, estructura y ecología de los foraminíferos bentónicos submareales. Dicho lo anterior, este trabajo se enfoca a ello, analizando la variación espacial y temporal de la composición isotópica de oxígeno ($\delta^{18}\text{O}$) en las testas de las biocenosis y tanatocenosis bajo las condiciones antiestuarinas actuales, con el propósito de relacionarlo con los cambios ambientales derivados de la alteración del ecosistema y establecer un marco de referencia para estudios futuros de la ecología del delta del Río Colorado.

3.2 Material y Métodos

Para el análisis isotópico se utilizaron las testas de *Ammonia sp.*, por ya existir datos de la composición isotópica de sus testas en el área (Téllez-Duarte et al, 2006; Huerta-Tamayo, 2007). Para ello se separaron 10 foraminíferos de cada estación tanto de la biocenosis como de la tanatocenosis cuya composición isotópica fue analizada en el Laboratorio de Isótopos Estables de la Universidad de Arizona, Tucson, E.U. Las muestras se sometieron a una reacción al vacío con 100% de ácido fosfórico deshidratado, a 70°C durante dos horas. Se analizó en un espectrómetro de masas Finnigan MAT 252 equipado con un dispositivo



automático de muestreo de carbonatos Kiel-III. Los valores de $\delta^{18}\text{O}$ se reportan con referencia al estándar V-PDB.

Para determinar si existen diferencias significativas espaciales (transectos) y temporales (a lo largo del ciclo anual), tanto para la biocenosis como para la tanatocenosis, a los datos de la concentración de $\delta^{18}\text{O}$ se le aplicó un análisis de varianza (ANOVA), con el programa estadístico "R" versión 2.12.2. Para ello, primeramente se probó la normalidad y homogeneidad de varianzas de los datos utilizando la prueba estadística de Shapiro-Wilks. Al no cumplirse este requisito, se optó por la prueba ANOVA tipo II, posteriormente para tener mayor precisión en la interpretación de los datos se realizó un análisis a posteriori utilizando la prueba de Tukey, para determinar cuáles fueron las temporadas más distintas o cuando mostraron similitud.

3.3 Resultados y Discusión

La temperatura a lo largo del ciclo osciló entre los 20 y 31°C con un rango de salinidad de entre 34 y 49‰ y valores isotópicos entre -2.45 y 5.94‰ (Tabla I).

3.3.1 Composición y abundancia

Considerando todas las estaciones de muestreo, se identificaron un total de 40 especies, de las cuales en la tanatocenosis 14 abarcan el 95% del total de la población, y solamente tres conforman más del 50% del total (*Ammonia sp*; *Criboelphidium sp*; y *Rosalina sp*). En la biocenosis solamente se identificaron 13 especies, siendo las más abundantes *Ammonia sp* y *Criboelphidium sp* (Fig. 5), comprenden el 86% del total de individuos (Tabla II). Estos organismos también han sido reportados por Huerta-Tamayo (2007), en la zona intermareal, sin embargo, el número de especies reportadas por este autor es 10% inferior a lo encontrado en este trabajo para la zona submareal. Lo anterior indica que la zona intermareal es relativamente menos diversa que la zona submareal debido a que esta última presenta condiciones de menor rigor ambiental. Sanders (1969), propuso la teoría de estabilidad-tiempo, donde plantea que las comunidades de organismos bentónicos pueden ser de dos tipos: (1) "comunidades físicamente controladas", que son aquellas que se encuentran expuestas a cambios físico-químico severos, como ocurre en bahías hipersalinas, esteros, desiertos, entre las más importantes, y (2) "comunidades biológicamente acomodadas", las cuales se presentan cuando las condiciones físico-químicas son uniformes durante un periodo de tiempo largo, de tal forma que se incrementan las interacciones biológicas y su diversidad. Por lo anterior, la zona submareal



al ser más estable en comparación con la intermareal, es una de las razones que explica la mayor diversidad relativa encontrada (Sanders, 1969; Abele y Walters, 1979). No obstante que el rigor ambiental aún es considerable dadas las condiciones hipersalinas actuales, como ya se comentó anteriormente, la falta del aporte de agua proveniente del Río Colorado ha propiciado un cambio en la salinidad del área de estudio, este cambio a su vez posiblemente ha provocado la modificación en la diversidad de especies de foraminíferos bentónicos que habitaban en el Alto Golfo de California.

3.3.2 Composición isotópica

3.3.2.1 Biocenosis

La variabilidad en la composición [$\delta^{18}\text{O}$] de los foraminíferos mostró dos patrones: (1) invierno-primavera, caracterizada por valores negativos; y (2) verano-otoño, en la que predominan valores positivos (Fig. 9). El rango de variación durante el ciclo anual fue de 8.09 ‰, con valores desde -2.15‰ hasta 5.94‰ (Fig. 9), lo cual es de esperar, ya que actualmente el área se encuentra influenciada por fuertes variaciones en las condiciones fisicoquímicas, principalmente temperatura y salinidad, donde la salinidad afecta directamente las concentraciones isotópicas del agua, mientras que la temperatura se refleja en la velocidad de reacción de la bioprecipitación del carbonato en las testas (Staines-Urias, comunicación personal). Dado que actualmente no existe aporte de agua dulce al delta, estas variaciones isotópicas pueden ser atribuidas exclusivamente a estas dos variables. Los altos valores positivos pueden atribuirse a que actualmente el delta es una cuenca de evaporación. Por lo tanto, el rango de variación de los valores isotópicos indican para el caso de los foraminíferos bentónicos en el área de estudio, que un cambio de 11°C corresponde a una variación de 8.09‰ en la concentración isotópica de oxígeno, donde el valor más negativo de -2.15‰ sería el valor mínimo esperado por efecto exclusivamente de la temperatura y salinidad bajo las condiciones actuales de no flujo. Por lo tanto, valores isotópicos más negativos en testas de foraminíferos bentónicos submareales indicarían el aporte y/o dilución de agua isotópicamente más ligera, como podría ser la proveniente del Río Colorado.

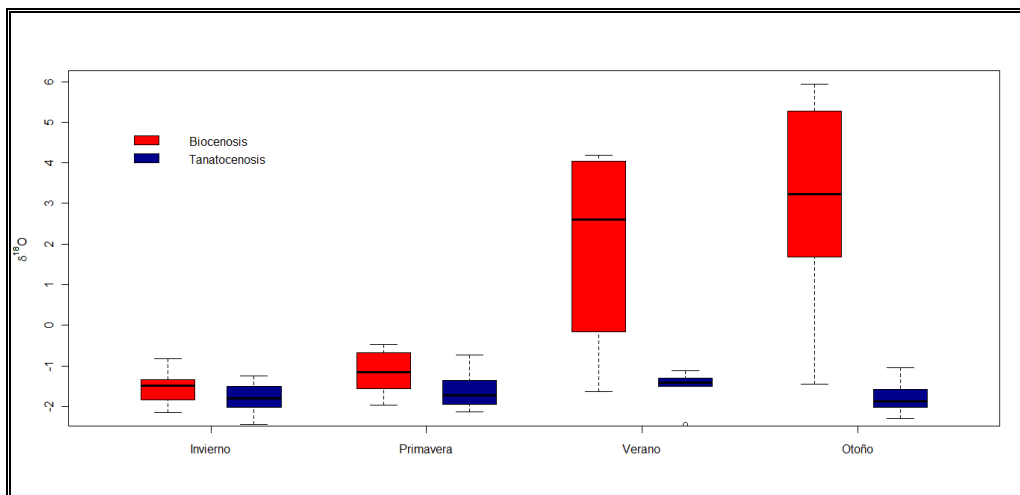


Figura 9. Rangos de variación de la composición Isotópica de oxígeno [$\delta^{18}\text{O}$] en la biocenosis y tanatocenosis de foraminíferos bentónicos en toda el área del delta del Río Colorado durante el ciclo anual

Rodríguez et al, (2001), reportan valores de 0.79‰ hasta -2.48‰ para el molusco bivalvo *Chione fluctifraga*, en el delta del Río Colorado en condiciones de ausencia de flujo de agua dulce; y valores de -1‰ hasta -6‰ para conchas fósiles del molusco bivalvo *M. coloradoensis* que vivió en condiciones estuarinas, cuando las aguas diluidas del río se extendían hasta los 65 km de la boca del río. Fuera de este rango geográfico, Téllez-Duarte et al, (2008b), reportan un valor mínimo de -2.37‰ en conchas del molusco bivalvo *P. grata* en un conchero arqueológico en Campo Cristina, aproximadamente 60 km al sur del límite del delta. Lo anterior sugiere que los rangos de variación isotópica relacionados por cambios en la temperatura son muy semejantes entre miembros de un mismo grupo taxonómico. Nuestros datos sobre foraminíferos bentónicos presentan un rango de variación más amplio que los reportados para bivalvos viviendo bajo las mismas condiciones ambientales. Estas diferencias pueden atribuirse al efecto vital que se presenta en organismos de diferentes taxa, los cuales responden ligeramente de forma distinta a una misma condición ambiental, ya que a pesar de que ambos organismos en principio al momento de formar sus testas o conchas, fijan el oxígeno que se encuentra en el agua circundante, el proceso de fijación puede diferir en organismos de diferentes taxa.

Por otro lado, Huerta-Tamayo (2007), reporta valores de -4.1‰ en biocenosis de foraminíferos bentónicos intermareales para la temporada de invierno en la Isla Zacatosa, en la desembocadura del Río Colorado. Ella relaciona este valor a posibles descargas de agua dulce del drenaje agrícola del valle de Mexicali, lo cual es plausible dada su cercanía a la



desembocadura del río. Por su parte, Staines-Urías y Douglas (2009), estudiaron el dimorfismo en foraminíferos bentónicos de aguas profundas en la cuenca Pescadero, donde reportan una variación isotópica entre 1.586‰ hasta 2.450‰ en un rango de seis a nueve grados centígrados, es decir, 0.864‰ en tres grados centígrados, lo que implica 0.288‰ por cada grado centígrado. Por lo que respecta a este trabajo, en los foraminíferos bentónicos submareales deltaicos la variación isotópica fue de 8.09‰ en un rango de 11°C lo que corresponde a 0.735‰ por cada grado centígrado. La anterior diferencia se puede deber, como ya se comentó, al efecto vital, que a pesar de ser organismos pertenecientes a un mismo grupo taxonómico, responden de forma distinta ya que las condiciones ambientales a las que están expuestos son completamente diferentes, pues los individuos estudiados por Staines-Urías y Douglas (2009) son de aguas profundas, a una temperatura mucho menor que la que se presenta en nuestro caso en la zona submareal, donde la máxima temperatura registrada fue de 31°C.

Al aplicar un ANOVA tipo II a los datos isotópicos se encontró que las temporadas eran estadísticamente diferentes entre sí. Sin embargo, mediante la Prueba de Tukey se pudo identificar que las temporadas de primavera–Invierno y Verano–Otoño son estadísticamente iguales, y que otra posible combinación de las temporadas serían estadísticamente diferentes, como lo sería el caso de Otoño–Invierno, Verano–Invierno, Primavera–Otoño o Verano–Primavera (Tabla V).

Tabla V. Análisis de Varianza y prueba de Tukey para Biocenosis.

Análisis de Varianza (ANOVA tipo II)					
Fuente de variación	SS	Gl	F	Pr(>F)	SC
Temporada	158.304	3	24.353	8.77E-09	***
Residuos	78.004	36			

Comparación Múltiple de las medias: Prueba de Tukey					
Temporadas	Estimación	Std. Error	Z value	Pr(> Z)	SC
Otoño - Invierno = 0	4.6308	0.6192	7.479	<0.001	***
Primavera - Invierno = 0	0.3838	0.5774	0.665	0.90826	
Verano - Invierno = 0	3.4688	0.8416	4.122	<0.001	***
Primavera - Otoño = 0	-4.247	0.6192	-6.859	<0.001	***
Verano - Otoño = 0	-1.162	0.8708	-1.334	0.53446	
Verano - Primavera = 0	3.085	0.8416	3.665	0.00123	**



3.3.2.2 Tanatocenosis

A diferencia de las biocenosis, las tanatocenosis no presentaron diferencias notables en la composición isotópica a lo largo del año (Fig. 9). Sin embargo, en todas las estaciones consistentemente los valores fueron negativos, asemejándose más a las condiciones de invierno-primavera de las biocenosis, y aún con valores más negativos que esta. Al ser las tanatocenosis la acumulación de las testas de foraminíferos muertos a lo largo del tiempo, y considerando que al hacer el análisis para identificar las comunidades de vivos/muertos, se separaron individuos adultos no teñidos (Rosa de Bengala), todos aquellos foraminíferos que se separaron para su análisis, presentaron valores isotópicos más negativos que los que se encontraron en las biocenosis. Por lo cual, tomando como base los trabajos realizados por otros investigadores donde se establecen los rangos de variación isotópica para las condiciones actuales y para las condiciones cuando las aguas del Río Colorado llegaban libremente a su delta, es de esperar que las tanatocenosis muestren una señal isotópica de las condiciones estuarinas o de flujo de agua isotópicamente más ligera que dominaban antes del represo de las aguas del río.

Esta acumulación de generaciones o promediado temporal, representan las condiciones ambientales promedio después de varias generaciones, por lo que en nuestro caso permite inferir que las condiciones ambientales que se encontraban en los años anteriores al represo de las aguas del río, fueron dominadas por aguas isotópicamente más ligeras que las actuales. Lo anterior se puede corroborar con los diversos trabajos realizados en el área de estudio con moluscos bivalvos, donde han establecido los rangos isotópicos de oxígeno antes y después de la construcción de las presas en la parte alta del Río Colorado (Téllez-Duarte et al 2008b; Rodríguez et al 2001; Celis-Hernández, 2011).

Huerta-Tamayo (2007), reporta valores para tanatocenosis de foraminíferos bentónicos intermareales de -3.55‰ hasta -5.5‰ , lo cual interpreta como indicativo de condiciones estuarinas hasta la playa "El Faro" al Sur de San Felipe. Sin embargo, atribuye estos valores a que existe un promediado temporal posiblemente influido por la mezcla de foraminíferos fósiles provenientes de un cantil costero del Pleistoceno, sitio hasta donde se extendía el área deltaica cuando las condiciones ambientales eran más húmedas y los aportes del río mayores, como lo sugieren valores de hasta -7.36‰ en las testas de los foraminíferos fósiles reportados por Ruvalcaba-Baroni (2005).

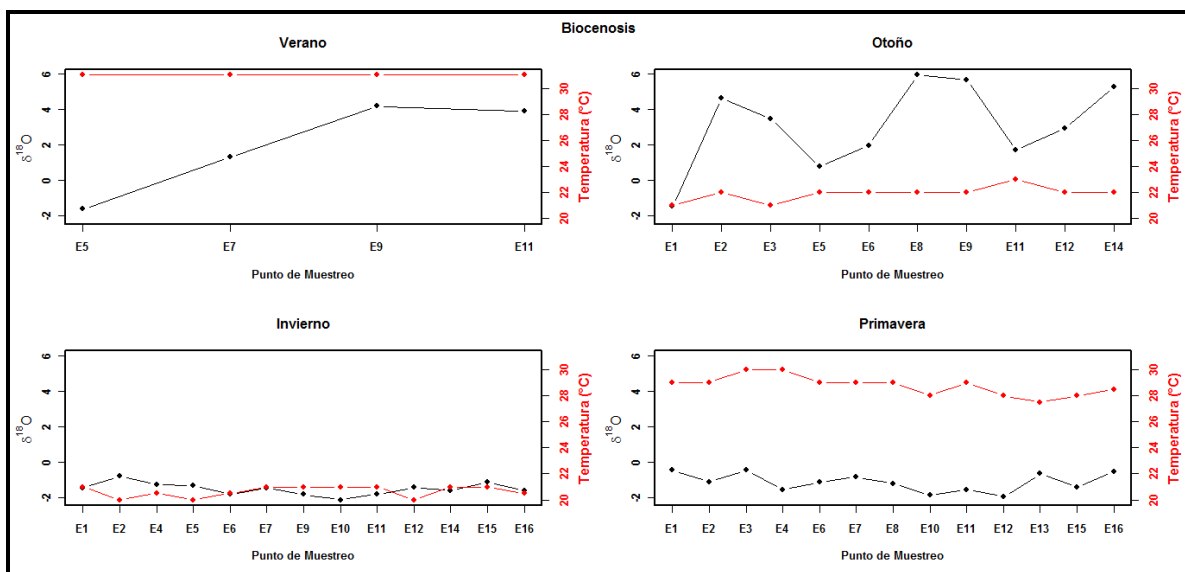
Al comparar las concentraciones isotópicas para todo el ciclo anual tanto para las biocenosis como para las tanatocenosis (Fig. 9), se puede observar que en la tanatocenosis los rangos



de variación isotópica van desde -0.74 hasta -3.04‰, como ya lo hemos comentado. Considerando que en la biocenosis el valor más negativo fue de -2.15‰, siendo éste valor en nuestro caso de estudio el límite de cambios exclusivamente influenciado por cambios en la temperatura y la salinidad. Por lo tanto, los valores reportados en este trabajo para la tanatocenosis son un indicador de las condiciones que dominaban en el área de estudio antes del represo del río. Además, tomando como base los trabajos de Téllez-Duarte et al (2008b) y Huerta-Tamayo (2007), con valores de -3.44 a -3.99‰ y de -3.55 a 5.5‰, respectivamente, podemos afirmar que los valores reportados en este trabajo para la tanatocenosis, representan al igual que en los trabajos anteriormente mencionados, un ambiente dominado por aguas isotópicamente más ligeras a las actuales, y dado que se tiene el registro bibliográfico de cuando se comenzó a bloquear el flujo de agua dulce al delta, podemos decir que las concentraciones isotópicas encontradas en la tanatocenosis indican condiciones estuarinas o de flujo de agua isotópicamente más ligera.

Las variaciones isotópicas en biocenosis y tanatocenosis en cada estación y temporada (Figs. 10a, 10b), muestran la relación entre la temperatura y la concentración isotópica de oxígeno, donde es posible el observar el comportamiento de dos procesos, por un lado el incremento de la temperatura, el cual da un incremento en la evaporación causando ligeras variaciones en la composición isotópica de oxígeno de las testas. En la biocenosis (Fig. 10a), se espera que a mayor temperatura mayor será la concentración del $\delta^{18}\text{O}$, debido a la relación entre la temperatura y la evaporación, que para el Alto Golfo de California se han reportado valores de hasta 0.9 m/año en el extremo norte (Lavín y Organista, 1988).

a)





b)

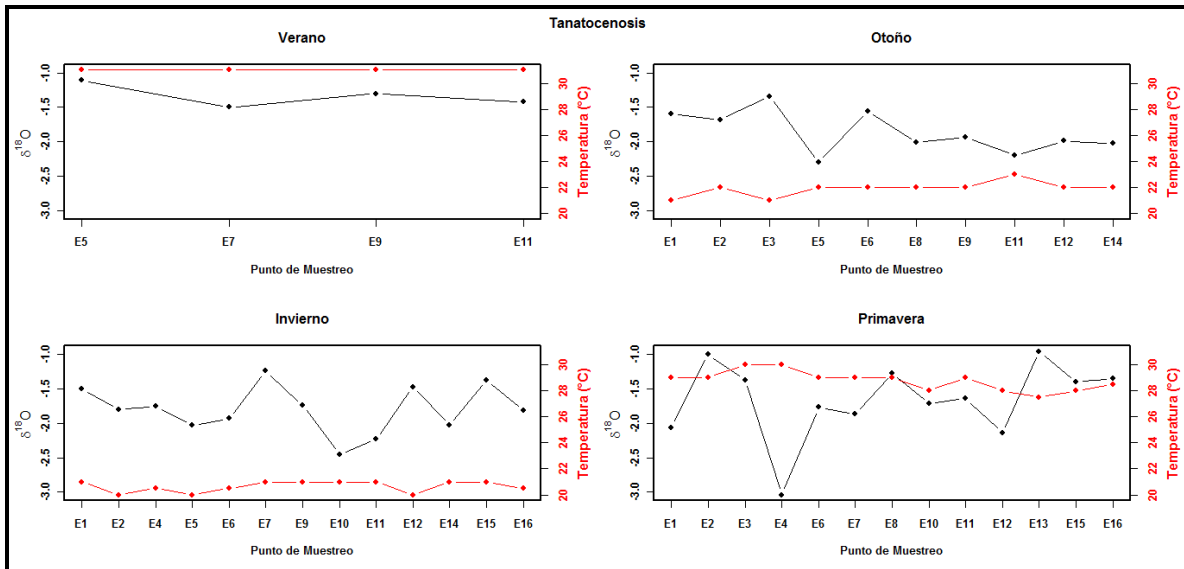
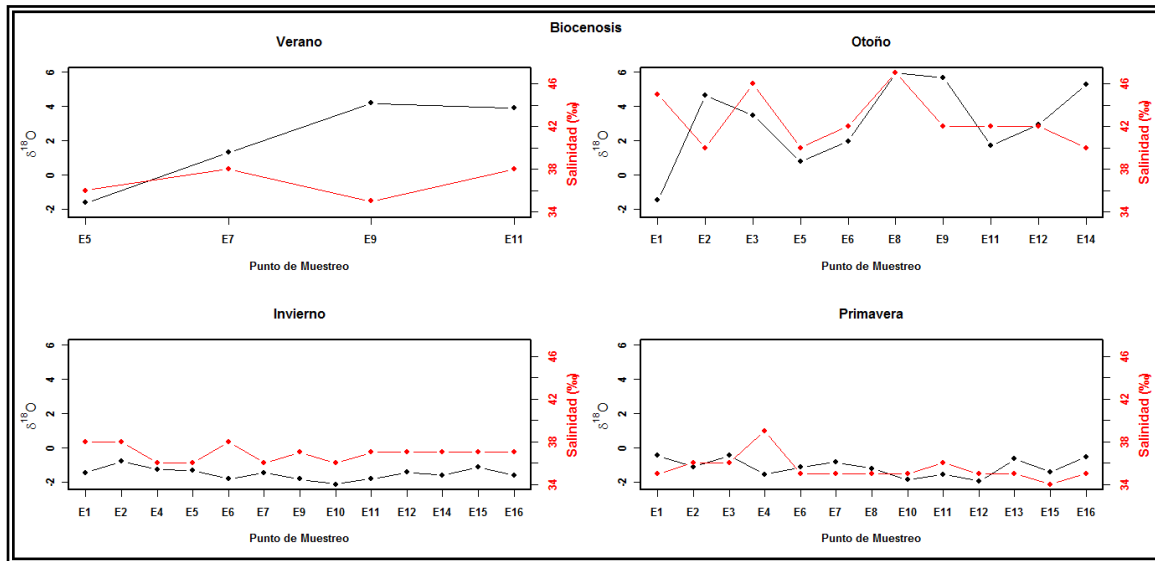


Figura 10. Distribución de la temperatura y composición isotópica de oxígeno [$\delta^{18}\text{O}$], de la Biocenosis (a) y Tanatocenosis (b) para el área muestreada. Las estaciones corresponden a las mostradas en la Figura 1. (No se presenta la totalidad de las estaciones de muestreo, debido a que presentaron valores bajos de voltaje, lo que no hace confiables los datos para una buena interpretación).

Sin embargo, al comparar la concentración isotópica de oxígeno contra la salinidad (Fig. 11a), se aprecia que la relación entre estas dos variables es mucho más estrecha que la que se presentó con la temperatura. Esto comprueba, cómo ya se mencionó, que a mayor temperatura más es la evaporación y por lo tanto va aumentando la salinidad, aunque también hay que considerar el hecho de que el área de estudio se localiza en una cuenca de evaporación. Por lo tanto, cuando la temperatura va aumentando propicia a su vez la evaporación del isótopo ligero ($\delta^{16}\text{O}$), el cual se eliminará dejando un enriquecimiento al isótopo pesado ($\delta^{18}\text{O}$), éste isótopo al mismo tiempo será fijado por los foraminíferos en sus testas de CaCO_3 (Celis-Hernández, 2011).



a)



b)

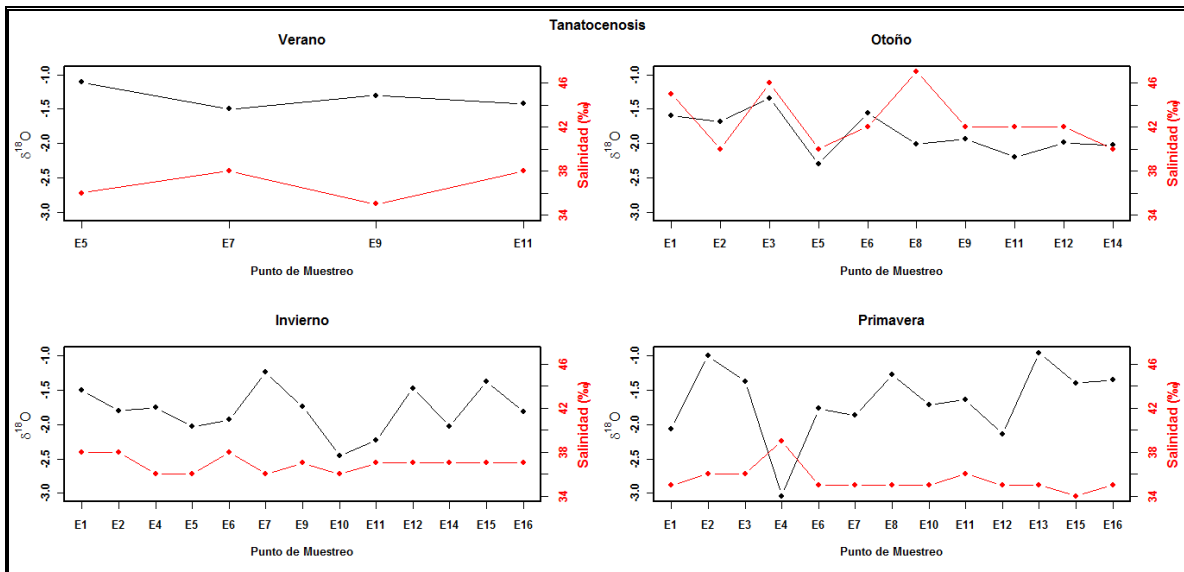


Figura 11. Distribución de la salinidad y composición isotópica de oxígeno [$\delta^{18}\text{O}$], de la Biocenosis (a) y Tanatocenos (b) para el área muestreada. Las estaciones corresponden a las mostradas en la Figura 1. (No se presenta la totalidad de las estaciones de muestreo, debido a que presentaron valores bajos de voltaje, lo que no hace confiables los datos para una buena interpretación).



Sin embargo, se observó que la concentración isotópica varía muy ampliamente para una misma temperatura (Fig. 12), lo que podría estar ligado al efecto vital de los organismos y explicarse debido a que el crecimiento óptimo de la especie analizada (*Ammonia* sp.), se encuentra en un rango de temperatura entre los 24° a 30°C (Usera y Blázquez, 1988). Por lo anterior y dado que en el área de muestreo se registraron temperaturas entre 20° a 31°C, es de esperar que dicha especie crezca prácticamente a lo largo de todo el año. Por lo que, en las biocenosis lo que se está registrando es un promedio de las temperaturas y salinidades a lo largo del ciclo de muestreo.

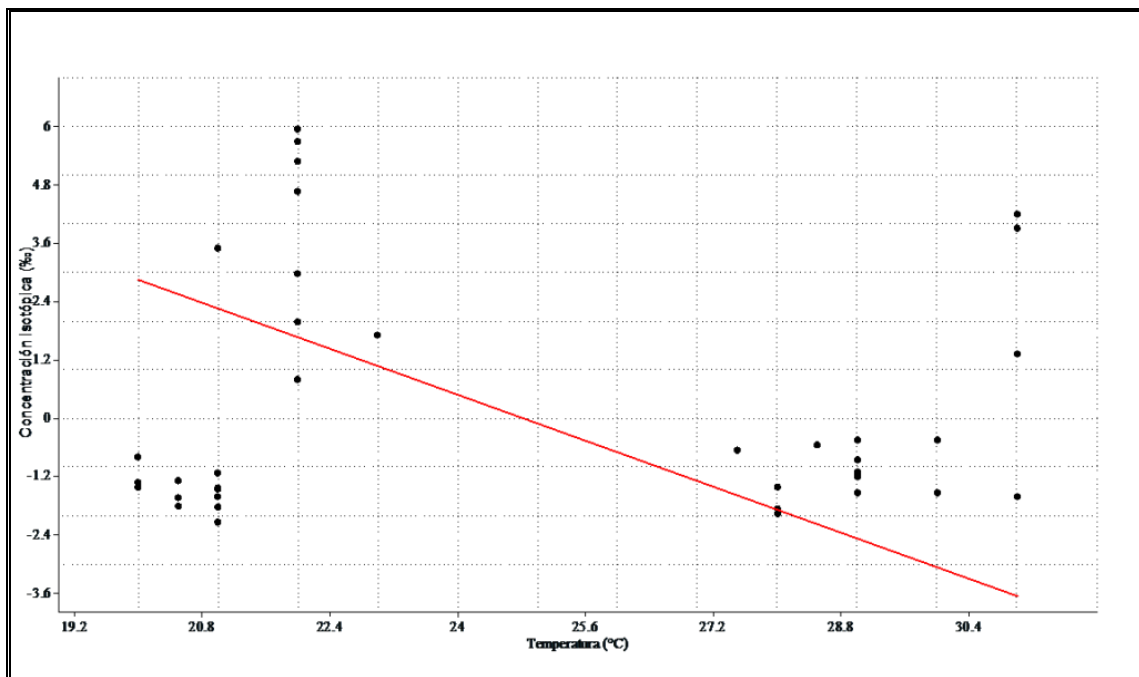


Figura 12. Modelo de predicción entre la Temperatura y la $[\delta^{18}\text{O}]$, donde se puede observar el rango de variación de la concentración isotópica para una misma temperatura, el valor de correlación encontrado de $r=-.037$.

Es importante el considerar que para obtener la composición isotópica, se realizó sin discriminar juveniles de adultos, y por los resultados obtenidos en las variaciones isotópicas es posible que los organismos juveniles pudieran ser aquellos que muestren las variaciones isotópicas ya que estos organismos al crecer más rápido son más susceptibles a los cambios que ocurren en el agua circundante, siendo de esta forma útiles para obtener datos más puntuales. Por otro lado y estadísticamente hablando, la salinidad presentó una mayor correlación con el isótopo de oxígeno con un valor de $r=0.62$ (Fig. 13). Esta prueba estadística se aplicó en ambas variables (salinidad y temperatura) como una herramienta



más para poder visualizar la relación que presentan los foraminíferos bentónicos del delta del Río Colorado con las condiciones ambientales en las cuales habitan, y de igual forma comprueban que el efecto vital en los organismos es diferente dependiendo del taxa al que pertenecen, puesto que individuos sometidos a un mismo rigor ambiental pero de diferentes taxa, responden de forma distinta a las condiciones ambientales que se presentan en el agua circundante. Lo anterior se puede comprobar con los análisis realizados por Téllez-Duarte et al (2008b), que proponen la relación que existe entre la variación isotópica y la temperatura para moluscos bivalvos; así como Staines-Urias y Douglas (2009), que estudiaron foraminíferos bentónicos de aguas profundas, y también encuentran una relación entre la temperatura y la concentración de isótopos de oxígeno sin tomar en cuenta la salinidad. Mientras que en nuestro caso dicha relación no es tan fuerte o estrecha como en los anteriores, sin embargo, encontramos que esta relación está presente entre las variables de salinidad y $\delta^{18}\text{O}$, más que con la temperatura, aunque se debe tener claro que la salinidad está de cierta forma ligada a los cambios en la temperatura, tomando como base el principio de a mayor temperatura mayor la evaporación, y mayor la salinidad presente.

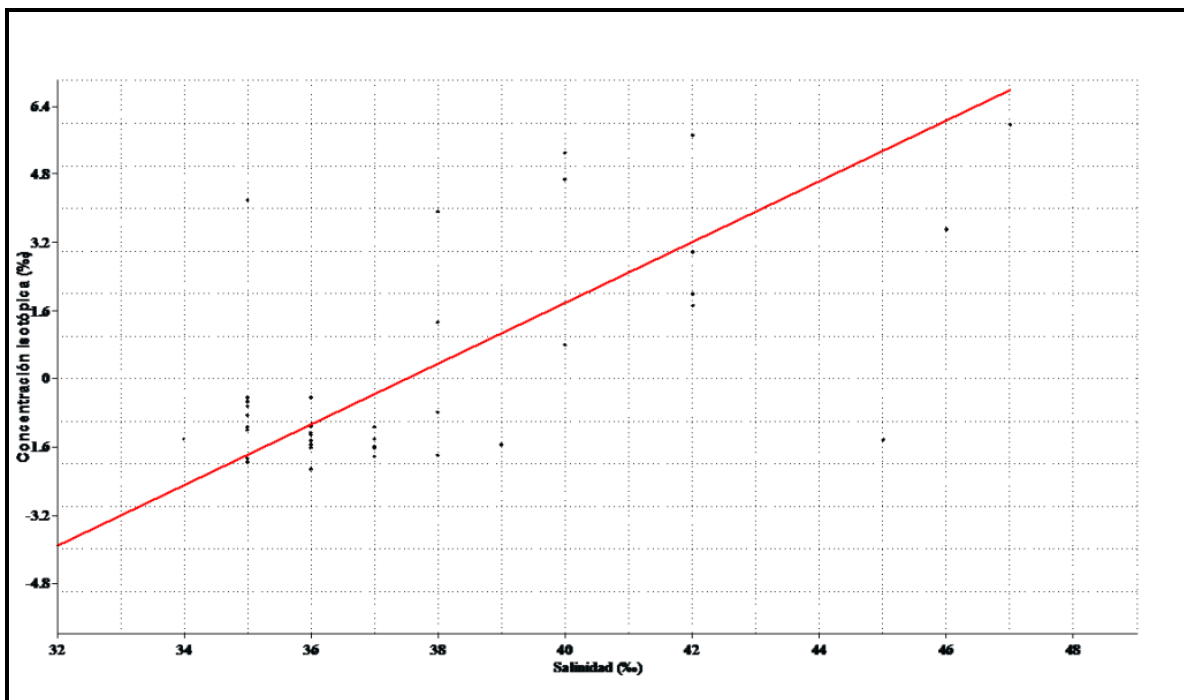


Figura 13. Modelo de predicción entre la Salinidad y la $[\delta^{18}\text{O}]$, donde se puede observar la relación que existe entre ambas variables con un valor de correlación encontrado de $r = 0.62$.



En contraste para el caso de la tanatocenos (Fig. 10b), la concentración isotópica de $\delta^{18}\text{O}$ no mostró un patrón coincidente con las variaciones en la temperatura ni en la salinidad (Fig. 11b), esto se puede explicar debido a que las testas de foraminíferos de esta comunidad fijaron el $\delta^{18}\text{O}$ con unas temperaturas y salinidades diferentes a las que se presentaron al momento del muestreo y que se puede decir son las actuales. Considerando que antes de la construcción de las presas en la parte alta del Río Colorado, aproximadamente hace 78 años, el flujo de agua dulce al delta era continuo, posiblemente se podría esperar que las concentraciones isotópicas de estas tanatocenos de foraminíferos reflejen condiciones estuarinas o predominantemente influenciadas por agua isotópicamente más ligera, proveniente de dicho río de años anteriores al represo. Aunque también podría deberse a las temporadas extraordinarias de flujo que como comenta Lavín y Sánchez (1999), en el año de 1993 se presentó lluvias que sobre pasó los límites de almacenaje de las presas, obteniendo como resultado que las compuertas fueran abiertas y que el flujo de agua que llegó hasta el lado mexicano fuera mucho mayor que el que recibe normalmente, dando como resultado una posible descarga hasta el delta. Es posible que la tanatocenos aquí reportada pudiera incluso, mostrar las condiciones isotópicas diluidas de estas temporadas, sin embargo, se recomienda para futuros análisis realizar una datación más precisa de las testas para estar conscientes del tiempo que se está representando, por el momento y al no tener dicha datación de la tanatocenos, y conociendo los valores isotópicos esperados para condiciones de flujo reportados por Rodríguez et al (2001), Huerta-Tamayo (2007) y Téllez-Duarte et al, (2008b), se puede vislumbrar cómo serían las condiciones ambientales en el caso de tener un flujo de agua dulce continuo al delta.

Lo anterior se comprobó al realizar una prueba estadística donde se encontró homogeneidad en las varianzas (Tabla VI), lo que nos indica que las temporadas no muestran diferencias significativas entre sí. Esto se interpreta como las condiciones ambientales que imperaban en el área de estudio antes del represo del Río Colorado, debido a que las testas de los foraminíferos fijan el $\delta^{18}\text{O}$ del agua circundante, por tal motivo reflejan la composición isotópica del agua en la cual vivieron (Téllez-Duarte et al., 2008b).



Tabla VI. Análisis de Varianza para Tanatocenosis.

Análisis de Varianza (ANOVA Tipo I)						
Fuente de variación	Gl	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	SC
Temporada	3	0.9009	0.30031	2.6934	0.06314	.
Residuals	31	3.4564	0.1115			

Como se ha comentado anteriormente, esta fijación de isótopos en las testas puede ser afectado o influenciado por la concentración de la salinidad, que según reportes bibliográficos para temporadas anteriores al represo, se encontraban entre los 35.2 y 35.7 ppm (Townsend, 1901). Estos valores son similares a los que se registraron para la temporada de primavera, dejando el resto de las temporadas (verano, otoño e invierno) con valores por encima de lo registrado para antes de las presas.

3.4. Conclusiones

- Las variaciones en el $\delta^{18}\text{O}$ de las testas de los foraminíferos de la biocenosis se asocian con los cambio en la temperatura ambiental, sin embargo se encuentran más fuertemente influenciadas por la composición isotópica del agua debida a las variaciones causadas por la evaporación.
- Dado que la tanatocenosis no fijó señales isotópicas actuales, representan un promedio temporal por la mezcla de generaciones existentes desde antes del represo de las aguas del Río Colorado hasta el presente.
- El rango de variación en el $\delta^{18}\text{O}$ en las biocenosis fue de 8‰, para un rango de temperatura de 11°C, mientras que en las tanatocenosis la variación isotópica fue de 2.3‰ para el mismo rango de temperatura.
- Con nuestros datos y bajo las mismas condiciones, para un rango de salinidad de 14‰, se esperaría una variación de la $\delta^{18}\text{O}$ de 8‰, en testas de foraminíferos vivos.
- La biocenosis presentó una relación entre la concentración de isótopos de oxígeno y la salinidad, ésta última podría ser la causa junto con la temperatura de las variaciones isotópicas. Para el caso de las tanatocenosis no se observaron dichas variaciones isotópicas ligadas a los cambios en salinidad y temperatura.



- Los datos isotópicos permitieron discriminar dos condiciones ambientales: temporadas cálidas (Verano–Otoño), y temporadas frías (Invierno-Primavera). En tanto en la tanatocenosis no se detectaron cambios importantes a lo largo del año debido al promediado temporal.
- Se recomienda para futuros análisis considerar la discriminación de organismos juveniles de los adultos, ya que la mezcla de generaciones pueden producir un sesgo en cuanto a la interpretación de los datos, dado que organismos adultos representan un promedio temporal de temperaturas, mientras que aquellos individuos juveniles al crecer más rápido son más susceptibles a los cambios en su entorno por lo tanto indicarían condiciones puntuales del ambiente en el que se desarrollan.
- Se recomienda para dar una interpretación más exacta de las condiciones ambientales pasadas, la posibilidad de realizar análisis de datación más precisos a las testas de foraminíferos que representan a la tanatocenosis, con el objetivo de conocer a que tiempo o época corresponden dichas testas.



4. Distribución de Foraminíferos Recientes Bajo Condiciones Antiestuarinas en el Delta del Río Colorado

Resumen

*La construcción de grandes presas en el Río Colorado ha producido un dramático efecto en la descarga de agua hacia su delta. Después de 1935, la drástica disminución de su caudal, ha causado un impacto ecológico notable por la disminución de flora y fauna en el área de influencia del río. Una forma de evaluar este impacto es a través de los cambios espaciales y temporales en la composición y estructura de las comunidades de foraminíferos bentónicos de la zona submareal del Alto Golfo de California. Esto parte del hecho de que los foraminíferos bentónicos son importantes indicadores de las condiciones fisicoquímicas en ambientes marinos costeros por ser muy sensibles a los cambios que ocurren en su entorno, reflejado en la presencia y abundancia de especies. Por ello, en este trabajo se analizaron los cambios estructurales durante el ciclo anual 2009–2010. Para ello, se hicieron muestreos estacionales (verano, otoño, invierno y primavera), de Campo Don Abel a la parte Sur de Isla Montague. Se realizaron cuatro transectos perpendiculares a la línea de costa adyacente a Baja California, y se obtuvo un total de 56 muestras. Estas se tiñeron con Rosa de Bengala para poder identificar la biocenosis de la tanatocenosis, se tamizó en húmedo para eliminar limos y arcillas, se tomaron las fracciones entre 63 y 180 μm , donde se separaron 300 individuos por muestra para posteriormente identificarlos. Se calculó la abundancia y diversidad por medio del índice de Shannon–Weaver, y la dominancia con el índice de Simpson. Con ayuda del programa estadístico Statistica ver. 7, se realizó diagramas de agrupamiento modo Q y R. Se hizo un mapa de distribución con la ayuda del software ArcGIS ver. 9 y los resultados muestran que los géneros más abundantes son: *Ammonia*, *Criboelphidium*, y *Rosalina* sp 1. Estos géneros son preferentemente de condiciones marinas, lo que indica el cambio en el Alto Golfo de California de un sistema estuarino a antiestuarino.*



4.1 Introducción

Durante los flujos continuos de agua dulce del Río Colorado antes de la construcción de las presas, la salinidad en el estuario fluctuaba entre 12 a 34‰, la que aumentó hasta 36 tras el cese total de aporte de agua dulce (Carbajal et al, 1997). Hoy en día, las condiciones antiestuarinas se han agudizado, registrándose salinidades de hasta 48‰ (Santa Rosa-del Río et al, 2011).

Como ya se ha comentado anteriormente, el impacto ecológico más severo fue la transformación de la hidrología de la zona deltaica de un ambiente estuarino a uno antiestuarino (Carbajal et al., 1997; Lavín et al., 1997; Cintra-Buenrostro et al, 2005), lo que provocó un deterioro ambiental que afectó no solo a la flora y fauna, sino también a la economía agrícola del Valle de Mexicali, ya que miles de hectáreas agrícolas se salinizaron debido al uso y reuso de agua en la parte superior de la cuenca y el escurrimiento de estas aguas salobres del Valle Welton-Mohawk de Arizona hacia Baja California (Bustillos-Duran, 2004).

Los foraminíferos bentónicos representan otra forma de analizar cambios en la ecología bentónica, ya que se distribuyen en casi una tercera parte del fondo oceánico, así como en la zona costera adyacente, incluyendo algunas formas de aguas salobres. (Bignot, 1988). Dado que su distribución está regida por las variables ambientales, como las características del sustrato y las condiciones fisicoquímicas de las aguas circundantes, son excelentes indicadores de los cambios ambientales tanto naturales como antropogénicos, por lo que en este trabajo se analiza la variación estacional y temporal de las biocenosis y tanatocenosis de foraminíferos bentónicos en el delta del Río Colorado, con el fin de identificar si sus cambios estructurales se explican por la desaparición del antiguo estuario.

4.2 Resultados y Discusión

4.2.1 Composición de las especies

4.2.1.1 Biocenosis

Se analizaron un total de 56 muestras de sedimento, donde se cuantificaron 20,051 individuos. La comunidad de biocenosis fue compuesta por 1,048 organismos que corresponden a 13 géneros, de los cuales solamente seis pudieron identificarse hasta nivel de especie donde una de ellas representa el grupo de formas aglutinadas. El 86% de los



individuos corresponden a dos géneros; *A. beccarii parkinsoniana* y *C. excavatum* (Tabla VII). Esto lo podemos atribuir al rigor ambiental presente en la zona de estudio. Sanders (1963), menciona que a mayor rigor ambiental, menor será la diversidad que cabría esperar. Dada las condiciones actuales del delta es posible que dicho rigor condicione a las especies de la biocenosis.

Tabla VII.- Listado de la abundancia total y relativa de los foraminíferos que conforman la biocenosis en el área deltaica durante el ciclo 2009 – 2010.

Especie	Abundancia total (No. de Individuos)	Abundancia Relativa (%)
<i>Ammonia beccarii parkinsoniana</i> (d'Orbigny, 1826)	676	64.5
<i>Criboelphidium excavatum</i> (Terquem, 1876)	226	21.6
<i>Bucella tenerrima</i> (Bandy, 1950)	25	2.4
<i>Quinqueloculina sp</i> (d'Orbigny, 1826)	24	2.3
<i>Rosalina sp</i> (d'Orbigny, 1826)	24	2.3
<i>Bulimina marginata</i> (d'Orbigny, 1826)	18	1.7
<i>Nouria polymorphinoides</i> (Heron-Allen y Earland, 1914)	17	1.6
<i>Bolivina sp</i> (d'Orbigny, 1839)	12	1.1
<i>Miliolinella sp</i> (Wiesner, 1931)	8	0.8
<i>Buliminella elegantissima</i> (d'Orbigny, 1826)	7	0.7
<i>Masselina sp</i> (Lacroix, 1938)	5	0.5
<i>Fissurina sp</i> (Reuss, 1850)	3	0.3
<i>Reusella sp</i> (Galloway, 1933)	3	0.3
Total	1,048	100



La especie aglutinada que se identificó fue *N. polimorphinoides* (Tabla VII). Este organismo se localizó en la parte alta del área de estudio (Fig. 1). Es importante considerarla dado que por sus características los foraminíferos aglutinados son un indicador de condiciones estuarinas, ya que las aguas dulces presentan un pH más ácido el cual inhibe la calcificación, por lo tanto las formas calcáreas tienden a disminuir, proliferando aquellas aglutinadas (Bernal et al., 2008). Considerando lo anterior la presencia de esta especie en los primeros transectos podrían indicar algún aporte proveniente de las descargas de agua que se utiliza para la agricultura en el valle de Mexicali (Huerta-Tamayo, 2007), puesto que como ya se sabe actualmente no hay un aporte fluvial por parte del río al delta.

4.2.1.1.1 Índices Ecológicos

Por lo que respecta a la abundancia, *Ammonia* y *Criboelphidium* fueron los géneros más abundantes, el primero con un 64.5%, del total de individuos identificados y *Criboelphidium* el 21.6%, dejando el resto de las especie con abundancias no mayores a 2.5% (Tabla VII). Es importante este dato, ya que habla de la capacidad de adaptarse de los foraminíferos a ambientes que se encuentran bajo un fuerte rigor ambiental. En el caso del delta del Río Colorado, las especies bentónicas se encuentran sujetas a un ambiente físicamente controlado, como lo describe Sanders (1969), con su teoría "Estabilidad-Tiempo". Dicho lo anterior es posible que aquellos géneros que no superan el 2.5% de abundancia, se deba a que el rigor ambiental presente en el área mantenga al margen la diversidad de especies. En cambio los géneros de foraminíferos que fueron más abundantes, posiblemente deban su abundancia a sus características eurióticas, y sobre todo eurihalinas, para poder soportar las condiciones antiestuarinas que se presentan hoy en día.

Las temporadas con mayor índice de riqueza fueron primavera e invierno, mientras que verano y otoño fue menor. En verano se encontró el menor número de especies y como ya se dijo, la falta de puntos por muestrear pudo ser la causa. Con respecto a la equitatividad, fue homogénea en todo el periodo de estudio (0.4 y 0.6), ya que la mayor abundancia de individuos se compone por solo dos especies (Tabla VII), y una baja diversidad (1.7), la que puede deberse al rigor ambiental presente en la zona de estudio, el cual es posible que sea responsable de evitar que las demás especies proliferen o en su defecto se diversifiquen sus géneros (Tabla VIII b).

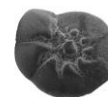


Tabla VIII.- Índices estadísticos de diversidad, equitatividad y dominancia para la comunidad de foraminíferos bentónicos del delta del río Colorado. a) Tanatocenosis y b) Biocenosis

a) Tanatocenosis

Periodo	(S)	(N)	(J')	(H')	(D)
Primavera	37	4,951	0.6	3.4	0.9
Verano	34	2,594	0.7	3.4	0.9
Otoño	35	6,405	0.7	3.3	0.8
Invierno	35	5,053	0.6	3.2	0.8
Ciclo 2009-2010	37	19,003	0.6	3.4	0.9

b) Biocenosis

Periodo	(S)	(N)	(J')	(H')	(D)
Primavera	13	329	0.6	2.1	0.6
Verano	6	116	0.5	1.2	0.5
Otoño	9	359	0.4	1.3	0.4
Invierno	12	244	0.5	1.8	0.6
Ciclo 2009-2010	13	1,048	0.5	1.7	0.5

4.2.1.1.2 Distribución espacial y temporal

Para obtener la distribución espacial y temporal de las diferentes especies que corresponden a la biocenosis, se emplearon diagramas de agrupamiento basados en distancias Euclidianas, donde es posible determinar cuál o cuáles son los transectos con mayor similitud en cuanto al número de individuos identificados por muestra, dado que los dendrogramas nos proporcionan una idea de las asociaciones que existen entre cada uno de los transectos, ya que a mayor similitud en el número de individuos en cada transecto, menor será la distancia representada en el gráfico. Se puede observar la distribución espacial que la biocenosis presentó a lo largo del ciclo muestreado (Fig. 14), donde se aprecian cuatro grupos, en los cuales los foraminíferos se concentraron en las estaciones ubicadas más al norte del área de estudio, lo que nos pudiera indicar que las especies presentes en la biocenosis se han adaptado a las condiciones presentes en el Alto Golfo de California, donde especies como *A. beccarii parkinsoniana* y *C. excavatum* dominaron por encima del resto de las identificadas.

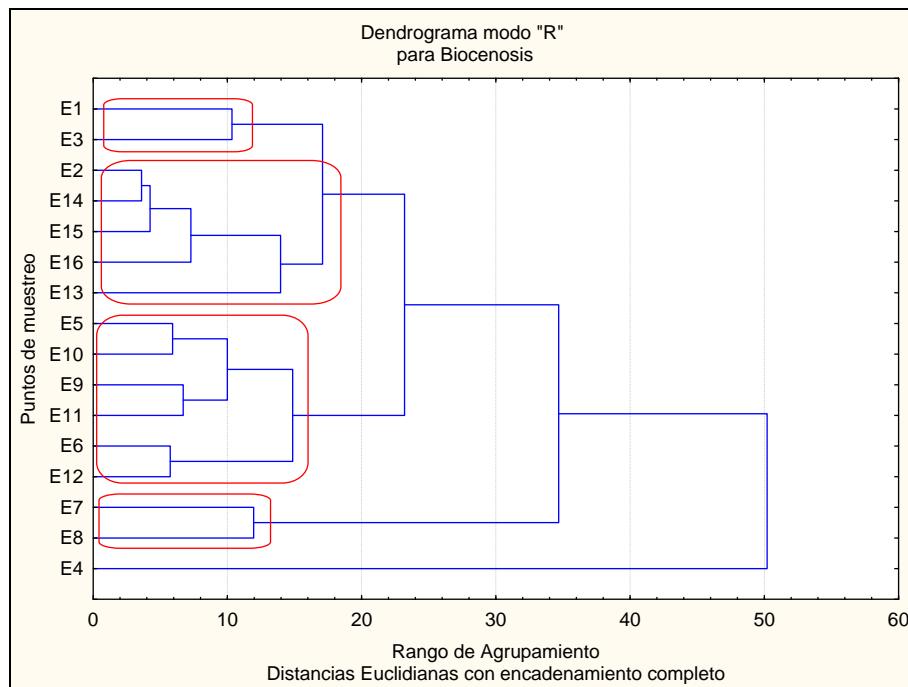


Figura 14. Dendrograma modo "R" para biocenosis

Con respecto a la relación entre ambas comunidades, la biocenosis presentó aumento en su abundancia de un 4% en verano a un 6% en primavera, esto posiblemente se deba a la etapa de reclutamiento que de acuerdo a Jorissen et al, (1999), mencionan que dicha etapa responde a un incremento en el fitoplancton presente en esa época del año, por tal motivo es de esperarse que los foraminíferos se concentren ya que el fitoplancton es su fuente de alimento.

4.2.1.2 Tanatocenosis

De los 20,051 individuos que se cuantificaron, 19,003 corresponden a las tanatocenosis. Donde se identificaron 40 individuos; 32 de ellos se llegó a nivel de especie y ocho a nivel de género. En general, la fauna se caracterizó por una baja diversidad.

Casi el 95% de los individuos lo constituyen 14 especies (Tabla IX), de las cuales las tres dominantes: *A. beccarii parkinsoniana*, *C. excavatum* y *Rosalina* sp 1, comprenden el 58% de la abundancia total (Fig. 5). *A. beccarii parkinsoniana* fue la más abundante durante todo el ciclo de muestreo, es una especie eurihalina y euritámica (Murray, 1991). Con preferencia en fondos fangosos aunque también se le encuentra en fondos arenosos, en profundidades que oscilan entre los 0 y 50 m (Usera y Blázquez, 1998). Considerando el actual estado del delta como un ambiente antiestuarino con salinidades y temperaturas altas



durante la mayor parte del año, resulta un buen lugar para la proliferación de esta especie, ya que se sabe que las condiciones óptimas para su desarrollo se encuentran en salinidades entre 20 y 40‰ y temperatura de 30°C (Usera y Blázquez, 1998), condiciones que reporta Santa Rosa-del Río et al (2011), para el delta del Río Colorado durante el periodo de 2009 a 2010. La segunda especie más abundante fue *C. excavatum*. Esta es común en ambientes estuarinos donde se asocia a praderas de pastos marinos (Murray, 1991), por tal motivo y debido a la presencia de extensas praderas de *Dystichlis palmeri* que se localizan en la zona costera y cerca de Isla Montague, es posible que se deba o esté relacionada a dichas praderas, y su presencia en la zona de estudio corresponda al transporte generado por las corrientes de marea, las cuales se han registrado de hasta un máximo de 12 m de diferencia (Fig. 15), en la boca del río (Thompson, 1968). La tercer especie dominante fue *Rosalina sp* 1, género que se distribuye primordialmente en océano abierto, aunque Phleger (1960), comenta que esta especie puede llegar a encontrarse en zonas lagunares, dicho lo anterior no es raro encontrarla en nuestra zona de estudio.



Figura 15. Efectos del refluo generado por los cambios de marea, en el delta del Río Colorado.



Tabla IX.- Listado de la abundancia total y relativa de las especies de foraminíferos más abundantes que conforman la tanatocenosis en el área deltaica durante el ciclo 2009–2010 (se enlistan solamente el 95% del total de individuos identificados, donde se consideran las especies que mostraron una abundancia relativa superior al 1%).

Espece	Abundancia total (No. de Individuos)	Abundancia Relativa (%)
<i>Ammonia beccarii parkinsoniana</i> (d'Orbigny, 1826)	5,653	28.19
<i>Criboelphidium excavatum</i> (Terquem, 1876)	3,206	15.99
<i>Rosalina sp 1</i> (d'Orbigny, 1826)	2,851	14.22
<i>Bucella tenerrima</i> (Bandy, 1950)	1,297	6.47
<i>Criboelphidium spinatum</i> var. <i>translucens</i> (Cushman and Brönnimann 1948)	1,276	6.36
<i>Ammonia sp</i> (Linné, 1758)	1,230	6.13
<i>Criboelphidium gunteri</i> (Cushman and Brönnimann 1948)	919	4.58
<i>Criboelphidium incertum</i> (Cushman and Brönnimann 1948)	800	3.99
<i>Criboelphidium poeyanum</i> (Cushman and Brönnimann 1948)	443	2.21
<i>Quinqueloculina sp 1</i> (d'Orbigny, 1826)	420	2.09
<i>Bulimina marginata</i> (d'Orbigny, 1826)	274	1.37
<i>Quinqueloculina sp 3</i> (d'Orbigny, 1826)	224	1.12
<i>Quinqueloculina sp 2</i> (d'Orbigny, 1826)	217	1.08
<i>Buliminella elegantissima</i> (d'Orbigny, 1826)	205	1.02
Total	19,164	94.82

Se identificaron cuatro géneros de foraminíferos aglutinados: *Ammoscalaria*, *Reophax*, *Anomaloides* y *Nouria* (Tabla III). El género *Ammoscalaria* representado por la especie *A. pseudospiralis* fue la más abundante (53%), y *R. dentaliformis* la más rara (5%). Debido a que en aguas dulces el pH es más ácido, esta condición inhibe la calcificación de las testas de carbonato de calcio, provocando la disminución de las formas calcáreas, dando lugar a una mayor abundancia de formas aglutinadas (Bernal et al., 2008). Por lo anterior, la presencia de foraminíferos aglutinados en el área de estudio podría ser un indicador del aporte fluvial previo a las presas, por lo tanto la aparición de foraminíferos aglutinados podrían indicarnos la extensión del antiguo estuario.

Los géneros más diversos en la tanatocenosis fueron *Criboelphidium* y *Quinqueloculina*. Estos géneros son considerados por Phleger (1960), como indicadores de aguas someras y



zonas de playa, en un rango de profundidades que va desde nueve hasta 30 m. El género *Criboelphidium*, presentó cinco especies dentro del 95% del total de individuos, lo que lo coloca como el género más diverso en todo el estudio, y *Quinqueloculina*, solamente presentó tres especies (Tabla IX). La presencia del último género Murray (1973), la asocia con ambientes hipersalinos, concordante con el actual estado hipersalino del Alto Golfo, el cual se ha transformado de un ambiente estuarino a un ambiente antiestuarino (Carbajal et al., 1997; Lavín et al., 1997; Avila-Serrano et al., 2006). Considerando que algunas especies de foraminíferos tienen la habilidad de adaptarse a diversos ambientes, lo que se encuentra fuertemente ligado al ciclo reproductivo y el rango de temperatura apto para ello, por tanto, es probable que la presencia de miliolidos en la zona, además de su asociación con ambientes hipersalinos también pueda deberse a su adaptación a los rangos de temperatura actuales del delta (Boudreau et al. 2001).

El género *Ammonia* se caracterizó por ser el género más abundante tanto por transecto como por punto de muestreo durante el ciclo estacional. Esta especie como ya se comentó, se caracteriza por tener una amplia distribución geográfica, así como de vivir preferentemente en aguas someras y ambientes con salinidades y temperaturas altas (Murray 1991; Walton y Sloan, 1990; Devenay et al., 1998). Estas características se presentan actualmente en la zona de estudio y son el hábitat ideal para las especies de este género, ya que en nuestro estudio se encontró tanto *A. beccarii parkinsoniana*, como *A. beccarii tepida*, aunque esta última en menor abundancia. Como ya se mencionó, este género se caracteriza por su gran distribución y alto grado de adaptación.

4.2.1.2.1 Índices Ecológicos

La riqueza de especies fue mayor en primavera con 37 especies identificadas y poco menos en verano con 34 (Tabla VIII a), mientras que la abundancia de otoño presentó mayor individuos. Aunque no es mucha la diferencia, se pueda argumentar lo que se mencionó anteriormente, está relacionado con las etapas de reclutamiento (Jorissen *et al*, 1999; Murray, 2000), donde cabe esperar que este aumento en la abundancia se deba a que las condiciones ambientales propicien un enriquecimiento en la productividad primaria, creando a su vez un aumento en las poblaciones de foraminíferos, como consecuencia de dicha temporada.

El índice de diversidad presentó para todo el ciclo valores entre 3.4 y 3.2, en primavera y verano, respectivamente. Los valores cercanos a cinco indican una alta diversidad, mientras



que si se acercan a cero la diversidad sería prácticamente nula (Bakus, 2007). Los valores muestran condiciones más estables en la zona submareal en comparación con la zona intermareal, ya que Huerta–Tamayo (2007) obtuvo valores de diversidad entre 0.83 y 0.6, y se puede explicar a que las condiciones ambientales en la zona intermareal se ven más afectadas por los procesos físicos de la zona costera, a diferencia de la zona submareal donde se esperaría encontrar condiciones con menores alteraciones, dado que siempre se encuentra cubierta por agua, a diferencia de la zona intermareal, la cual experimenta grandes periodos de tiempo expuestas, donde las temperaturas son más extremas que cuando la zona está sumergida como el caso del submareal (Rodríguez et al, 2001; Avila-Serrano et al, 2006).

Por lo que respecta a la equitatividad, indica que tan iguales son sus abundancias, en este caso, mostró poca variación (0.6 y 0.7). Su valor va de cero a uno, de forma que uno corresponde a situaciones donde todas las especies son igualmente abundantes (Bakus, 2007). Los valores más altos fueron en verano y otoño, mientras que primavera e invierno son las temporadas más bajas. Dicho lo anterior, en nuestro caso estos valores muestran que la comunidad se encuentra distribuida de manera homogénea en todo el ciclo de estudio, debido a que la mayor abundancia de individuos se compone de un número muy reducido de especies. Cabe resaltar que para verano a pesar de haber sido la temporada en la que se presentaron dificultades en los muestreos, presentó el valor más alto en cuanto a la equitatividad, lo que nos hace pensar que posiblemente en verano y otoño las especies se encontraban en un ambiente óptimo lo que ayudó a que se distribuyeran más homogéneamente el número de individuos que el resto del año.

Para el caso de la dominancia (D) pocas especies son dominantes, de hecho se podría decir que solamente dos de ellas fueron las que dominaron en el estudio (Tabla VIII a). En primavera y verano se presentaron los valores más altos (0.9), mientras que otoño e invierno los más bajos (0.8). Sobresale *A. beccarii parkinsoniana*, como la especie más dominante al ser cosmopolita, nerítica y euriótica, que a pesar de ser principalmente de ambiente oceánico, también se encuentra en ambientes estuarinos. Comprueba la estrategia k y r explicada por Usera y Blázquez (1998).

Lo que se observa en nuestro estudio con el aumento de la abundancia y dominancia de *A. beccarii parkinsoniana*, es que presenta un comportamiento tipo “r” tanto en las biocenosis como en las tanatocenosis, ya que aumenta la densidad de individuos, a su vez sus formas macrosféricas tienen mayor abundancia con respecto a las formas microsféricas. Este



aumento de formas macrosféricas puede adjudicarse a un ambiente óptimo para el desarrollo de esta especie y se puede relacionar con lo que Usera y Blázquez (1998) mencionan, que cuando *A. beccarii* se encuentra en ambientes próximos a su óptimo de crecimiento, suelen abundar las formas macrosféricas sobre las microsfericas, considerando que estos autores indican el óptimo de su crecimiento a temperaturas de hasta 35°C y salinidades máximas de 50‰, teniendo en cuenta que el presente trabajo las temperaturas llegaron a los 31°C y las salinidades hasta las 49‰ (Tabla I), por lo que se puede deducir que dicha especie respondió a un óptimo de crecimiento y abundancia.

4.2.1.2.2 Distribución espacial y temporal.

Con el objetivo de conocer la distribución espacial de las comunidades de foraminíferos, se realizaron diagramas de agrupamiento basados en distancias Euclidianas. Es posible determinar cuál o cuáles son los transectos con la mayor similitud con base al número de individuos identificados por muestra, tanto para la tanatocenosis como la biocenosis, ya que el dendrograma nos proporciona una idea de las asociaciones que existen entre cada uno de los transectos, donde aquellos que muestren una similitud entre el número de individuos que se contabilizan.

Se representa la biocenosis y tanatocenosis en forma de dendrograma (Fig. 16), se nota la diferencia del agrupamiento de los foraminíferos para cada temporada y en cada una de las comunidades. Para el caso de la tanatocenosis, la agrupación se da con las temporadas de otoño, invierno y primavera, dejando el verano fuera, esto puede ser por el hecho de que en dicha temporada, hubo problemas logísticos que impidieron cumplir con la totalidad de los transectos. Por esta razón es posible que el número de individuos identificados en la tanatocenosis para dicha temporada, no se acerque al promedio de las otras y por lo tanto esté fuera del grupo.

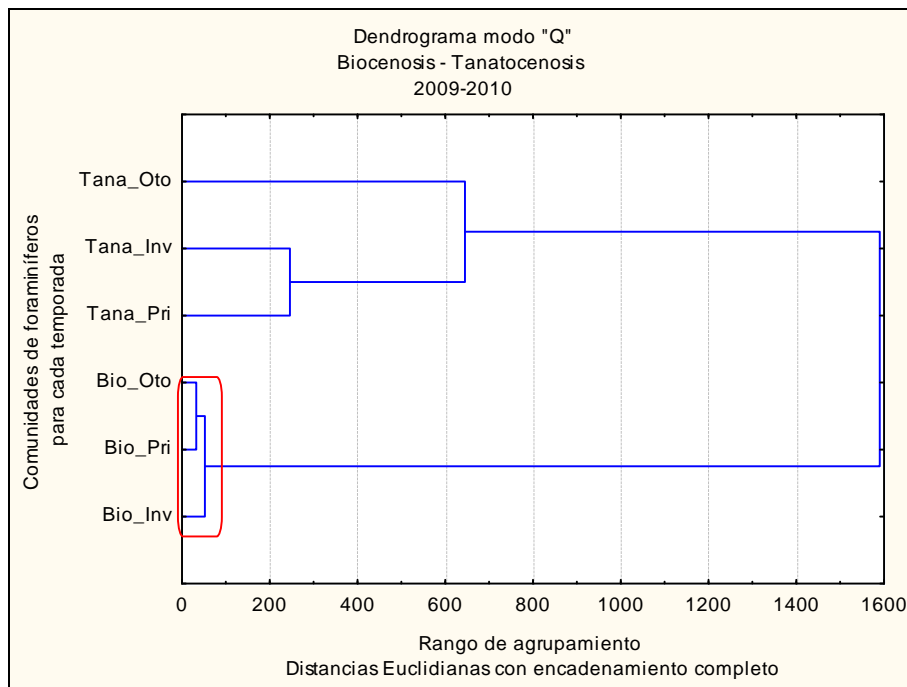


Figura 16. Dendrograma modo "Q" para ambas comunidades durante el muestreo

La tanatocenosis forma dos grupos principales (Fig. 17), abarcan prácticamente todos los puntos de muestreo, y deja un grupo compuesto por dos puntos ubicados en la parte sureste de la zona de estudio. Estas agrupaciones se distribuyen en la parte central y alejada de la línea de costa, que se puede explicar por las condiciones climáticas presentes en las temporadas muestreadas, donde Lavín et al, (1997), mencionan la existencia de giros estacionales en el Alto Golfo de California, los cuales podrían ser la causa de la distribución de las testas. Estos arreglos o agrupaciones pueden deberse a los distintos procesos fisicoquímicos que ocurren en la zona, ya que en verano y primavera la temperatura del agua fluctuó entre 27° a 31°C, mientras que en otoño e invierno fue más baja, entre 20° y 23°C (Santa Rosa-del Rio et al, 2011), por lo que estos organismos tienden a distribuirse y/o agruparse de acuerdo a las características ambientales que se presenten en su entorno (Bignot, 1988).

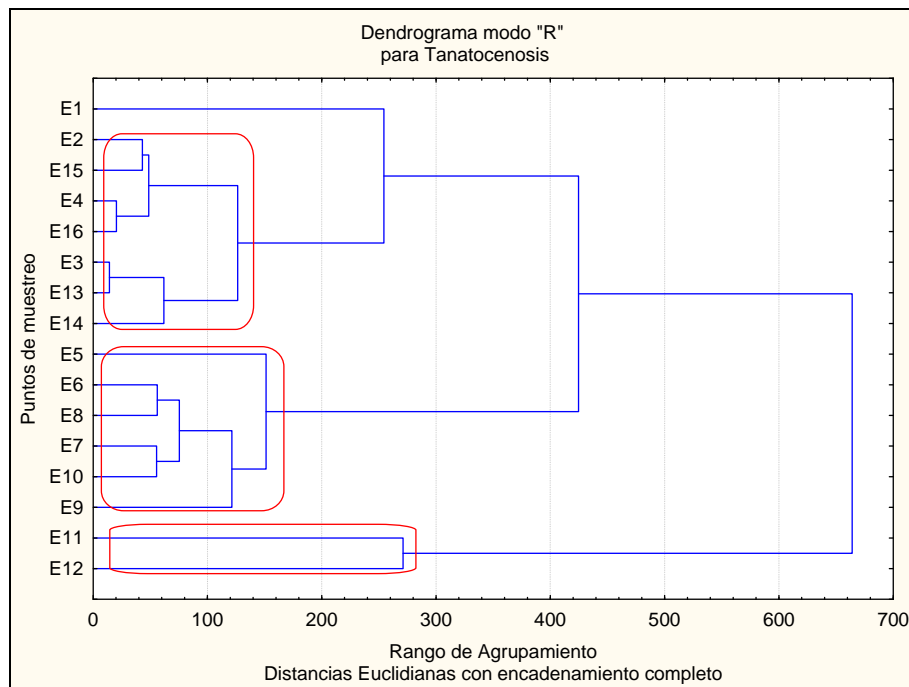


Figura 17. Dendrograma de agrupamiento modo "R" para la Tanatocenosis

4.2.2. Estructura de las comunidades.

Se calculó la relación de la abundancia entre la tanatocenosis y la biocenosis (Fig. 18), donde se observa que la mayor abundancia de individuos pertenece a la tanatocenosis con 96% en verano y se mantiene constante durante todo el ciclo hasta llegar a la primavera con 94%.

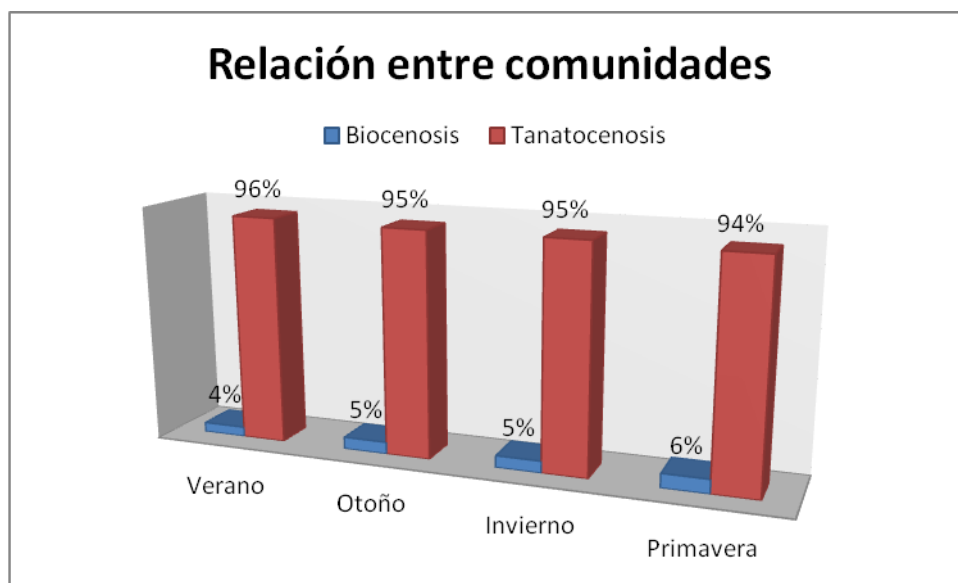


Figura 18. Relación de la abundancia entre ambas comunidades durante el ciclo de muestreo



La estructura de las biocenosis fue muy similar a la que se encontró en la tanatocenosis (Tabla X), sin embargo se encontraron algunas especies en la tanatocenosis que no tienen su contraparte en la biocenosis y viceversa, esto concuerda con lo reportado por Huerta-Tamayo (2007), para la zona intermareal del Alto Golfo de California, donde encontró la misma relación entre ambas estructuras. Esto es un índice del sesgo tafonómico presente en la zona de estudio, donde es importante el analizar estas diferencias en cuanto a las especies que se encuentran en cada una de las comunidades, ya que la aparición o desaparición de especies es un método indirecto para la comprensión de los cambios en cualquier medio ambiente. Dentro de las especies que se encontraron en la biocenosis, que no se presentaron en la tanatocenosis está: *Pseudomassilina*, y *Miliolinella*, las cuales forman parte del grupo de los Miliolidos, los cuales, de acuerdo a Murray (1973) prefieren ambientes con salinidades altas. Esto concuerda con el actual estado del delta del Río Colorado, que al no tener aporte de agua dulce, se ha transformado de un sistema estuarino a un antiestuarino con salinidades altas. Lo anterior concuerda con los estudios realizados con otros grupos taxonómicos que indican cambios estructurales de las comunidades atribuibles a la desaparición del estuario (Téllez-Duarte et al, 2008b; Rodríguez et al, 2001).



Tabla X. Comparación de la estructura poblacional entre ambas comunidades

Especie	Tanatocenosis	Biocenosis
<i>Ammonia beccarii parkinsoniana</i>	✓	✓
<i>Criboelphidium excavatum</i>	✓	✓
<i>Bucella tenerrima</i>	✓	✓
<i>Quinqueloculina</i>	✓	✓
<i>Rosalina</i>	✓	✓
<i>Bulimina marginata</i>	✓	✓
<i>Nouria polimorphinoides</i>	X	✓
<i>Bolivina</i>	X	✓
<i>Miliolinella</i>	X	✓
<i>Buliminella elegantissima</i>	✓	✓
<i>Pseudomasselina</i>	X	✓
<i>Fissurina</i>	X	✓
<i>Reusella</i>	X	✓



4.3 Conclusiones

- El foraminífero más abundante tanto en la biocenosis como en la tanatocenosis fue *A. beccarii parkinsoniana*.
- La biocenosis presentó una baja diversidad, ya que los géneros fueron representados por una sola especie.
- *Ammonia* y *Criboelphidium* fueron los géneros más dominantes, según el índice de dominancia de Simpson, con respecto a las demás que componen la biocenosis.
- La estructura poblacional de la biocenosis fue muy similar a la encontrada en la tanatocenosis, sin embargo se encontraron algunas especies que no tienen su contraparte entre ellas, lo que indica el sesgo tafonómico que existe en el área de estudio, así como la adaptación de las especies a nuevas condiciones ambientales.
- En la tanatocenosis, los géneros más diversos fueron *Criboelphidium* y *Quinqueloculina*. *Ammonia beccarii* junto con los Miliolidos, son especies que preferentemente se encuentran en ambientes hipersalinos. Por lo que respecta a *Criboelphidium*, su abundancia se explica por los pastos marinos ubicados en el área deltaica.
- La presencia de foraminíferos aglutinados indica el antiguo aporte fluvial en el área de estudio, así como su ausencia en la parte norte se explica debido a que es una zona tafonómicamente activa, lo que reduce las probabilidades de preservación de las testas.
- Las tres especies dominantes en tanatocenosis fueron: *A. beccarii parkinsoniana*, *C. excavatum* y *Rosalina sp1*, lo cual se comprobó al aplicar el índice de dominancia de Simpson.
- Existe una baja equitatividad de las especies debido a que la mayor abundancia de individuos lo compone un número muy reducido de especies para ambas comunidades.
- Predominaron las formas macrosféricas sobre las microsféricas en los rotálidos en el caso particular del género *Ammonia*, lo cual está fuertemente relacionado con las condiciones ambientales (altas temperaturas y salinidades) presentes que para el caso de este género, quedan dentro de su óptimo de crecimiento.



5. Composición isotópica de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) en Foraminíferos Bentónicos, en el Delta del Río Colorado

Resumen

Los foraminíferos bentónicos como ya se sabe son excelentes indicadores ambientales, debido a que sus testas precipitan CaCO_3 , donde registran la concentración isotópica del entorno. Al igual que las variaciones de $\delta^{18}\text{O}$ sirven para analizar cambios ambientales, los isótopos estables de carbono, en especial el $\delta^{13}\text{C}$, (representando la razón isotópica $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$), son útiles para interpretar ambientes antiguos, y para estimar zonas o temporadas con altas tasas de producción primaria, ya que el detritus precipitado al bentos al ser degradado por procesos bacteriológicos, influye en la composición isotópica del entorno, misma que registran las testas de los foraminíferos. En este capítulo, proporcionaremos los rangos de variación isotópica del $\delta^{13}\text{C}$ de las comunidades de foraminíferos bentónicos del delta del Río Colorado. Se realizaron cuatro campañas de muestreo en un año (2009-2010) en la zona submareal adyacente de Baja California. Se trazó cuatro transectos perpendiculares a la línea de costa, y cada uno tiene cuatro estaciones; se obtuvo en ellas: sedimento, salinidad y temperatura *in situ*. En laboratorio se separaron 300 individuos por muestra; se tomó submuestras para el análisis isotópico. Los datos se trataron con los programas R 2.12.2; PAST 1.81 y ArcMap 9.3. En la Biocenosis el rango de variación isotópica fue -2.95 a -1.05‰ con intervalo de temperatura de 11°C e indica condiciones antiestuarinas; en la Tanatocenosis fue de -3.56 a -0.99, es indicio de condiciones estuarinas previas al represo.



5.1 Introducción

Los foraminíferos precipitan CaCO_3 en equilibrio con la composición isotópica del agua de mar y el carbono inorgánico disuelto (CID). Sin embargo, mientras que la composición isotópica de oxígeno en el carbonato de los foraminíferos ($\delta^{18}\text{O}$, representando la razón isotópica $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) depende de dos variables, la temperatura ambiental a la que el foraminífero calcifica y la composición del agua de mar en la cual se forma la testa, en el caso de los isótopos estables de carbono, la composición del carbonato de las testas de los foraminíferos ($\delta^{13}\text{C}$, representando la razón isotópica $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$), depende mayoritariamente de la composición del carbono inorgánico disuelto (CO_2), y no es afectada por la temperatura ambiental. Consecuentemente, diversos autores (Fontanier et al, 2006; Brückner y Mackensen, 2007) han propuesto que las variaciones en el $\delta^{13}\text{C}$ en foraminíferos bentónicos registran cambios en el aporte de *phytodetritus* al bentos. Es decir, incrementos rápidos en la producción de fitoplancton debidos a un incremento en la producción primaria superficial (blooms de fitoplancton), resultan en el aporte al bentos de materia orgánica con una composición isotópica más ligera. Cuando esta materia orgánica es degradada por la actividad bacteriana, el resultado es carbono orgánico disuelto de una composición isotópica más ligera. Por lo tanto, los cambios en la composición isotópica del CID son registrados por los foraminíferos cuando estos precipitan carbonato para formar sus testas, resultando en valores de $\delta^{13}\text{C}$ más negativos (Mackensen et al, 1993)

5.2 Resultados y Discusión

5.2.1 Biocenosis

La composición isotópica de carbono al igual que la de oxígeno, mostró cuatro temporadas distintas que pueden ser clasificadas en dos grupos: (1) invierno-primavera, y (2) verano-otoño. El segundo grupo es caracterizado por valores de $\delta^{13}\text{C}$ más negativos. El rango de variación isotópica anual de esta comunidad fue de 1.9‰ (de -2.95‰ a -1.05‰, Tabla I, Fig. 19). Un análisis de varianza demostró que cada temporada es significativamente diferente de las otras (Tabla XI).

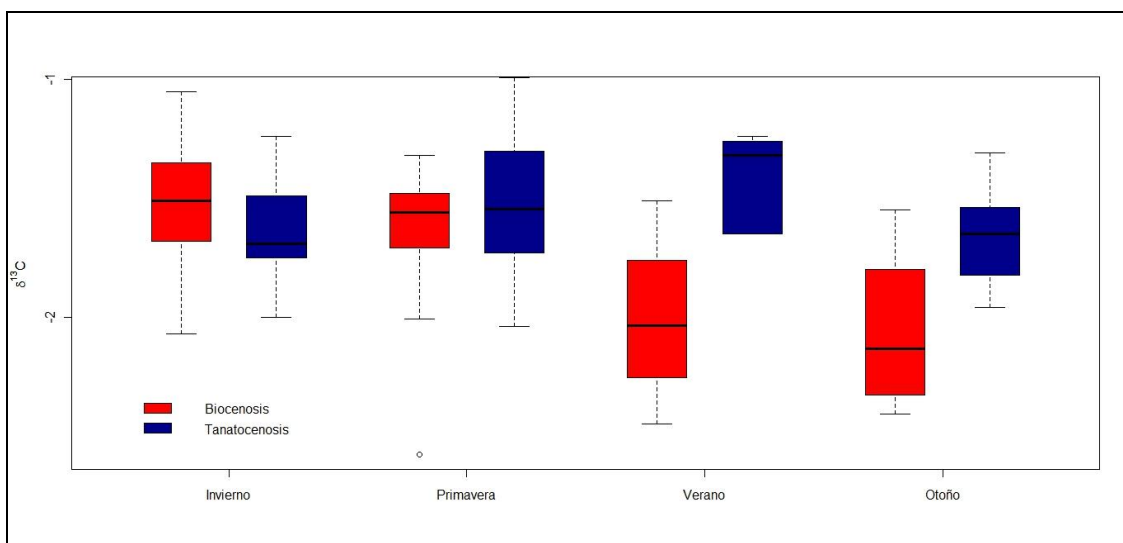


Figura 19. Relación entre composiciones isotópicas de carbono para ambas comunidades.

Tabla XI. Análisis de Varianza y prueba de Tukey para biocenosis

Análisis de Varianza ANOVA (Tipo II)					
Biocenosis	SS	Df	F	Pr(>F)	
Temporada	1.9167	3	8.0932	0.000354	
Residuals	2.6051	33			
Comparación Múltiple de las medias: Prueba de Tukey					
Temporada	Estimado	Error Std	Z	Pr(> z)	
Otoño - Invierno == 0	-0.50431	0.11818	-4.267	< 0.001	***
Primavera - Invierno == 0	-0.05831	0.11818	-0.493	0.95976	
Verano - Invierno == 0	-0.45981	0.16065	-2.862	0.02087	*
Primavera - Otoño == 0	0.446	0.12565	3.549	0.00211	**
Verano - Otoño == 0	0.0445	0.16622	0.268	0.99314	
Verano - Primavera == 0	-0.4015	0.16622	-2.415	0.07224	.

Para visualizar las variaciones en la composición isotópica de carbono, se graficó la distribución espacial y temporal de la composición isotópica (Fig. 20). Ahí se aprecia un gradiente de norte a sur en las concentraciones. Los valores de $\delta^{13}\text{C}$ muestran que las estaciones del norte (transecto I y II, Fig. 1), parecen influenciadas por aportes provenientes del Río Colorado y que tal influencia disminuye al alejarse de la boca del río y de la línea de costa. Dado que actualmente no existen aportes fluviales del río hacia el delta, el gradiente observado en los valores de $\delta^{13}\text{C}$ pudiera deberse a flujos procedentes de las zonas agrícolas del Valle de Mexicali (Huerta-Tamayo, 2007; Hinojosa-Huerta y Carrillo-Guerrero,



2010). Los aportes fluviales provenientes de zonas agrícolas típicamente se caracterizan por altas concentraciones de materia orgánica que además, presenta una composición isotópica más ligera, ya que es producto de la degradación de materia vegetal terrestre (García-Hernández, 2007). Consecuentemente, tales aportes pueden ser responsables de las variaciones observadas en el $\delta^{13}\text{C}$ de *Ammonia* sp a lo largo de la zona estudiada. En la figura 20, se muestran los aportes de agua por parte del Río Colorado, donde se puede observar que días antes al muestreo de otoño se realizó una descarga fluvial hacia el lado mexicano, dicha descarga pudiera ser la responsable de las variaciones isotópicas encontradas, ya que por lo regular los excedentes de agua que llegan al lado mexicano son utilizados con fines agrícolas, por lo tanto es posible que el excedente ocurrido el día 11 de noviembre pudiera haber llegado a los canales del Río Colorado dando como resultado una variación en la composición isotópica $\delta^{13}\text{C}$ reflejada en las testas de los foraminíferos.

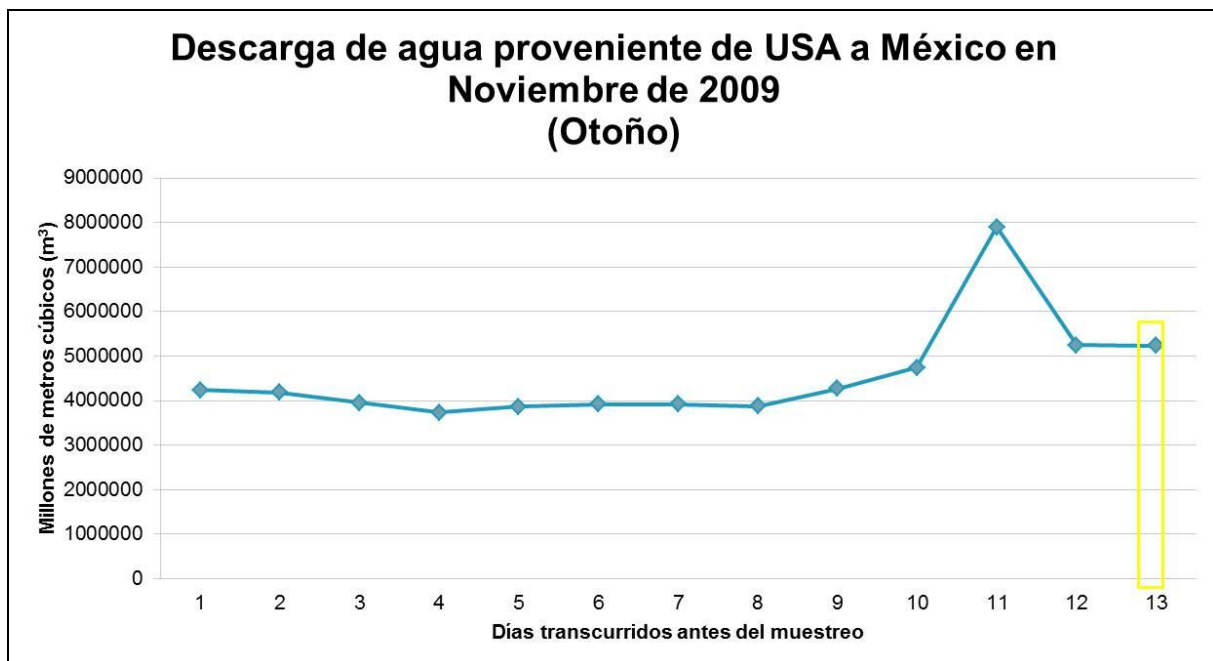


Figura 20. Descarga de H_2O proveniente del Río Colorado al lado mexicano durante la temporada de otoño 2009, el rectángulo amarillo indica el día que se realizó el muestreo (Fuente: Comisión internacional de Límites y Aguas entre México y los Estados Unidos (CILA)).

En la figura 21 se muestran las cuatro temporadas durante el muestreo, la primera mitad del área de estudio (parte norte, transectos I y II), se encuentra caracterizada por valores negativos en la composición isotópica de carbono, los cuales al igual que en el caso de los isotopos de oxígeno, cuando provienen de aguas isotópicamente más ligeras tienden a tener



valores más negativos (color rojo, Fig. 21), mismos que van tornándose positivos conforme desaparece la influencia del río y comienza la influencia marina (Rodríguez et al., 2001). Es importante notar en la temporada de otoño, que existen variaciones en cuanto al gradiente de distribución, lo cual se puede relacionar con lo discutido anteriormente acerca de la etapa de reclutamiento en esa temporada, que provoca un incremento en la cantidad de phytodetritus que es precipitado al fondo (Mackensen et al, 1993).

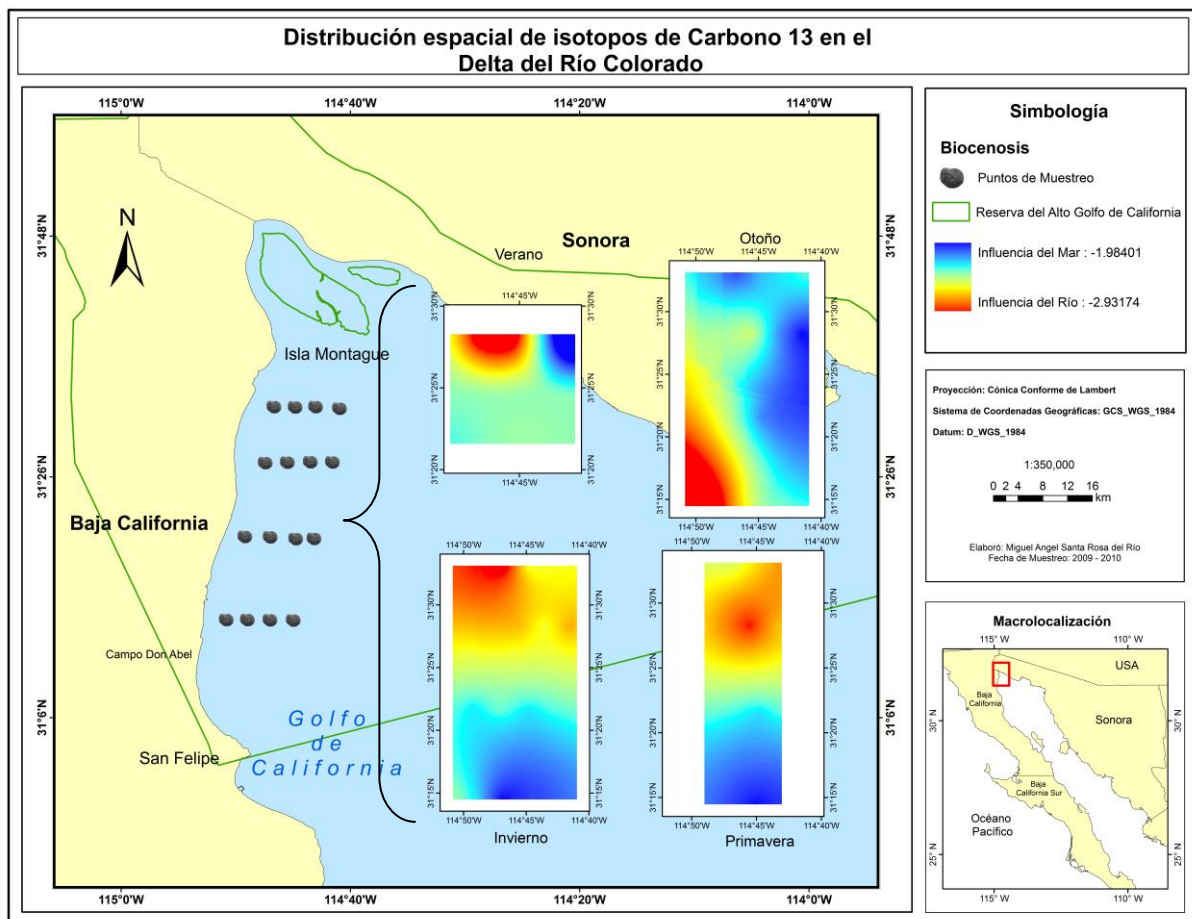


Figura 21. Distribución espacial de las concentraciones isotópicas de carbono para biocenosis durante el ciclo, se muestran en la cara del mapa las cuatro temporadas realizadas (verano, otoño, invierno y primavera).

5.2.2 Tanatocenosis

Por lo que respecta a la tanatocenosis, esta no mostró diferencias significativas en todo el ciclo (Fig. 19), teniendo un rango de variación isotópica de 2.57‰, con valores que van desde -0.99 a -3.56‰ (Tabla I). Con estos datos podemos considerar al igual que lo sucedido con los isótopos de oxígeno, la señal isotópica representada en la tanatocenosis responde a un promediado temporal, el cual correspondería a las condiciones ambientales



previas al represo de las aguas del Río Colorado, ya que como sabemos, el organismo al momento de morir deja de asimilar las condiciones ambientales que se encuentran en su entorno, por esto es de esperar que las señales isotópicas en esta comunidad sean un reflejo de condiciones pasadas.

Espacialmente, las concentraciones isotópicas a lo largo del año mostraron un gradiente similar al de la biocenosis (Fig. 22), sin embargo, en la tanatocenosis se observa cómo la distribución espacial es más homogénea y el gradiente se marca claramente en dirección norte-sur. Esto refuerza las conclusiones hechas por Téllez-Duarte et al (2008b), quienes en registros de un conchero ubicado en el límite sur del delta del Río Colorado a 65 km de la desembocadura, reportan señales isotópicas de la extensión del antiguo estuario. En esta figura (22), se puede observar como la mayor parte del área de estudio está dominada por valores isotópicamente más ligeros (color rojo), y se puede ver que prácticamente no cambia durante todo el ciclo muestreado, ya que como se ha comentado, las testas dejan de asimilar los cambios ambientales de su entorno al momento de morir el organismo. Sin embargo, es importante considerar el promediado temporal que existe en el área de estudio, puesto que los organismos que forman parte de la tanatocenosis pueden ser individuos que no necesariamente pertenezcan al tiempo en el que el río fluía libremente, además se debe tomar en cuenta el efecto vital de los foraminíferos, que como comenta Staines-Urias y Douglas (2009), los individuos que pertenecen a la tanatocenosis que no llegaron a un desarrollo adulto, pueden presentar diferencias en la concentración isotópica comparándolos con aquellos que muestran un desarrollo completo, el cual aunado al efecto vital que varía entre individuos jóvenes de los adultos, puede ocasionar diferencias en las concentraciones isotópicas de los análisis.

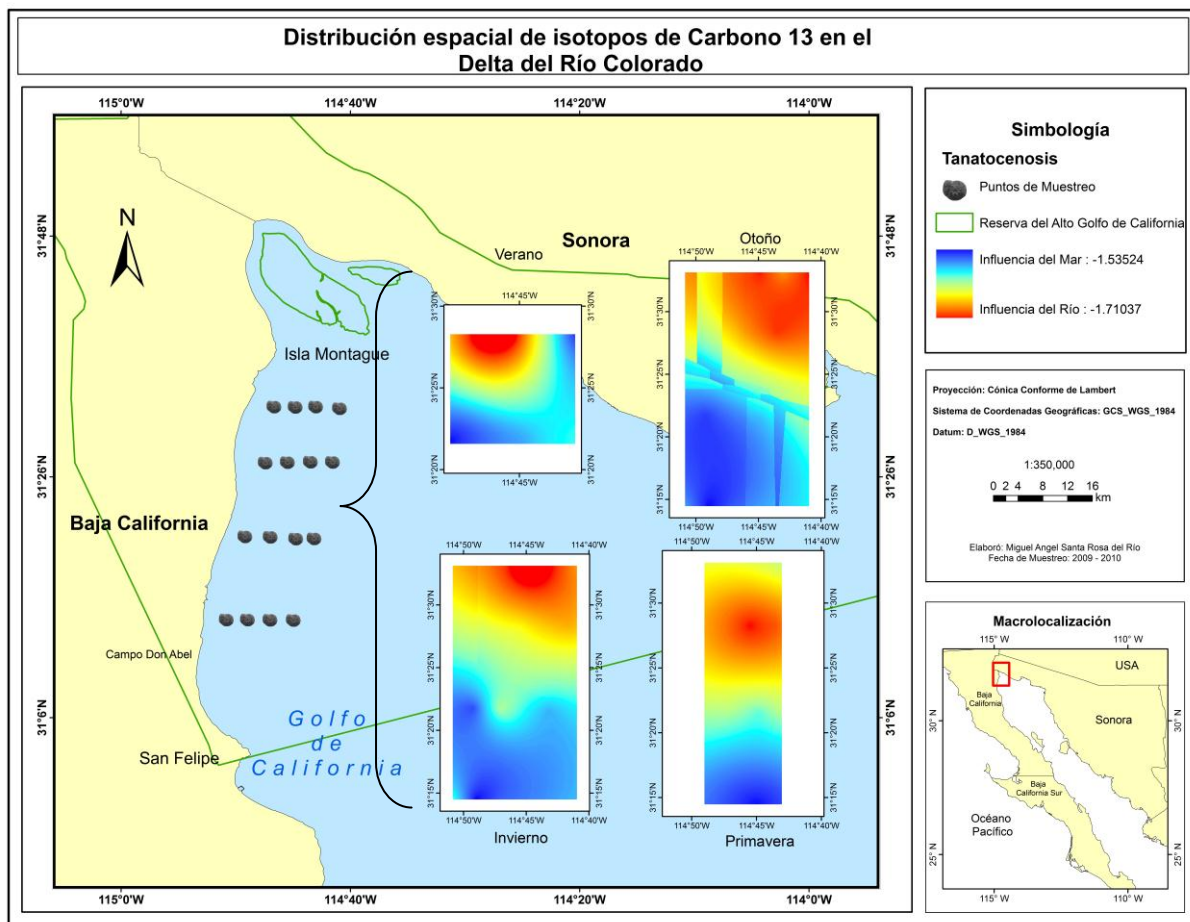


Figura 22. Distribución espacial de las concentraciones isotópicas de carbono para tanatocenos durante el ciclo, se muestran en la cara del mapa las cuatro temporadas realizadas (verano, otoño, invierno y primavera).

Por lo anterior y al igual que lo discutido en el capítulo 3, es importante tomar en cuenta para futuros análisis la separación de individuos jóvenes de aquellos adultos, ya que ambos metabolizan de forma diferente las variables que se encuentran en su entorno, las cuales si no se hace una separación apropiada, al momento de hacer los análisis isotópicos se podría presentar un sesgo, que no necesariamente correspondería una influencia fluvial o terrígena, sino posiblemente responda a las variaciones isotópicas debidas al efecto vital de organismos jóvenes y adultos.

Con base a todo lo anteriormente discutido, al comparar los datos de isótopos de oxígeno (Fig. 9) con los de carbono (Fig. 19), se discriminan dos ambientes que coinciden con las temporadas de reclutamiento de las comunidades de foraminíferos, como ya fueron discutidas en el capítulo 4. Sin embargo, cabe mencionar que se presentó un gradiente conforme se aleja de la boca del río y de la línea de costa (Fig. 21), dicho gradiente no es



evidente en los $\delta^{18}\text{O}$ debido a que las variaciones isotópicas en el carbono son mucho más notorias con respecto a las que se presentan en los isótopos de oxígeno (Fontanier et al, 2006; Staines-Urias y Douglas, 2009).



6. Conclusiones generales

Después de un ciclo anual en el que se tomaron muestras de sedimento para poder obtener submuestras de foraminíferos bentónicos, identificamos un total de 40 especies, donde 32 fueron identificadas hasta el nivel de especie y las ocho restantes solo se llegó hasta el nivel de género. La especie más abundante fue *A. beccarii parkinsoniana*, presente tanto en la biocenosis como en la tanatocenosis, se encontró en 55 de 56 muestras analizadas, lo que indica ser una especie con una gran capacidad de adaptación, capaz de soportar cambios bruscos de temperatura y salinidad.

Por lo que respecta a la diversidad se encontró que *Criboelphidium* y *Quinqueloculina* fueron los géneros más diversos ya que cada uno fue representado por seis especies del total identificadas, lo cual concuerda con el actual estado del delta, ya que en el caso de los Miliolidos estos prefieren los ambientes hipersalinos al igual que *Ammonia*. Para el caso de *Criboelphidium*, su presencia en el zona de estudio puede deberse a las praderas de pastos marinos, donde hay registros que mencionan es donde mayormente se congregan los individuos de este género, y que su presencia en el área de estudio se deba al transporte ocasionado por los altos rangos de marea que actualmente se tienen en el delta del Río Colorado.

La equitatividad en el área es baja, ya que la mayor parte de los individuos lo compone un número muy reducido de especies.

Con respecto a la dominancia, se obtuvo que *A. beccarii parkinsoniana*, *C. excavatum* y *Rosalina* sp fueron los más dominantes según el índice de dominancia de Simpson, lo que nos ratifica la tolerancia de estas especies a condiciones hipersalinas, cálidas y que pueden sobrevivir tanto en condiciones de flujo y no flujo de agua dulce, ya que los resultados de los índices ecológicos concuerdan en ambas comunidades.

En cuanto a la distribución temporal de los foraminíferos, se encontró que la mayor abundancia se presentó en otoño, debido posiblemente a que en esta temporada se presenta el reclutamiento de especies, ocasionadas por un aumento en el fitoplancton, mientras que las temporadas que mayor similitud tuvieron en el número de individuos registrados fueron invierno y primavera.



A su vez se observó que las especies dominantes en el área de estudio presentaron un patrón de distribución espacial, donde en los transectos del norte (cercanos a la boca del río), las especies del género *Criboelphidium* fueron las que mayor abundancia tuvieron, al igual que los foraminíferos pertenecientes al grupo de aglutinados, *Rosalina* sp fue preferentemente se localizó en la parte central del área, mientras que la especie con mayor abundancia de todas (*A. beccarii*), fue la que se encontraba en las estaciones centrales y del sur (más alejadas de la boca del río).

La estructura poblacional de la biocenosis fue muy similar a la que se encontró en la tanatocenosis, sin embargo se encontraron algunas especies que no tienen su contraparte en la biocenosis y viceversa, lo que nos indica el sesgo tafonómico que existe en el área de estudio, así como la adaptación de las especies a nuevas condiciones ambientales.

Por lo que respecta al análisis isotópico de oxígeno, al no existir un aporte de agua isotópicamente más ligera proveniente del Río Colorado, las variaciones isotópicas encontradas en las testas de foraminíferos de la biocenosis se relacionan a cambios de la temperatura y la salinidad. En el caso de las tanatocenosis ya que estas no fijaron señales isotópicas actuales, representan un promediado temporal por la mezcla de generaciones existentes desde antes del represo de las aguas de dicho río hasta el presente.

Se encontró que la variación en la concentración $\delta^{18}\text{O}$ en la biocenosis fue de 8‰ para un rango de temperatura de 11°C, mientras que en la tanatocenosis la variación isotópica fue de 2.3‰ para el mismo rango de temperatura. Por lo tanto, de acuerdo a nuestros datos bajo las mismas condiciones, para un rango de salinidad de 14‰ se esperaría una variación en la concentración isotópica de oxígeno de 8‰ en testas de foraminíferos vivos.

Lo anterior debido a que se presentó una relación entre la concentración isotópica de oxígeno y la salinidad, es por eso que ésta última podría ser la causa junto con la temperatura de las variaciones isotópicas. En el caso de las tanatocenosis no se encontraron dichas variaciones ligadas a los cambios en la salinidad y temperatura.

Con los datos isotópicos pudimos discriminar dos condiciones ambientales: temporadas cálidas (verano-otoño), y temporadas frías (invierno-primavera), en tanto en las tanatocenosis no se detectaron cambios importantes en la composición isotópica a lo largo del año debido al promediado temporal.



Con los datos de $\delta^{13}\text{C}$, se encontró un rango de variación en la biocenosis de -2.95 a -1.05‰ con intervalo de temperatura de 11°C e indica condiciones antiestuarinas; en la Tanatocenosis fue de -3.56 a -0.99, es indicio de condiciones estuarinas previas al represo.

Se comprobó lo encontrado con el análisis isotópico de oxígeno, donde se presentan dos temporadas: cálidas y frías, las cuales es posible que en el caso de las biocenosis respondan a un incremento en el *phytodetritus* ocasionado por el *bloom* de fitoplancton que se da en la etapa de reclutamiento, la cual coincide con los valores más negativos en cuanto a la concentración isotópica de carbono.

Por lo que respecta a la tanatocenosis, estadísticamente hablando no se encontraron diferencias significativas, sin embargo se pudo determinar un gradiente en la concentración isotópica de carbono, reflejada en la distribución espacial y temporal de las comunidades de foraminíferos bentónicos, donde se puede apreciar los límites de la influencia del Río Colorado.



7. LITERATURA CITADA

- Álvarez-Borrego, S. 1999. Upper Gulf of California and the Colorado River, Baja, Mexico. Contribution 33. In: U. Seeliger, L. Drude de Lacerda and B. Kjerfve (eds.), Coastal Marine Ecosystems of Latin America. Springer-Verlag (in press).
- Álvarez-Borrego, S. 2001. The Colorado River Estuary and the Upper Gulf of California Baja, México. In: U. Seeliger & B. Kjerfve (eds.), Coastal Marine Ecosystems of Latin America. Ecological Studies 144, Springer Verlag, Berlín Heidelberg, 360 p.
- Álvarez-Borrego, S., B. P. Flores Báez y L. A. Galindo Bect. 1975. Hidrología del Alto Golfo de California II. Condiciones durante invierno, primavera y verano. Ciencias Marinas, 2 (1): 21-36 p.
- Arche, A. 1992. Sedimentología., Consejo superior de investigaciones científicas, Madrid. 1: 397 – 451.
- Andreasson, F.P., Birger, S. y Jönson, E., 1999. Surface-water seasonality from stable isotope profiles of *Littorina littorea*: implications for paleoenvironmental reconstructions of coastal areas. Palaios, 14: 273-281.
- Avila-Serrano, G. E., Flessa, K. W., Téllez – Duarte, M. A., Cintra – Buenrostro, C. E. 2006. Distribución de la Macrofauna Intermareal del Delta del Río Colorado, norte del Golfo de California, México. Revista Ciencias Marinas, 32(4): 649-661 p.
- Baba, J., Peterson, C.D., Schrader, H.J., 1991a. Modern fine-grained sediment in the Gulf of California during the last century. In: Dauphin, J.P. and Simoneit, B.R.T. (Eds.), The Gulf and Peninsular Province of the Californias. AAPG Memoir 47, 569-587.
- Basak, C., Rathburn, A. E, Pérez, M. E., Martin, J. B., Kluesner, J. W., Levin, L. A. De Deckker, P., Gieskes, J. M., Abriani, M., 2009. Carbon and oxygen isotope geochemistry of live (stained) benthic foraminifera from the Aleutian Margin and the Southern Australia Margin. Marine Micropaleontology. 70: 89-101.
- Bakus. Gerald J., 2007. Quantitative analysis of marine biological communities: field biology and environment. John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. 435 p.



- Bandy, O. L. 1967. Foraminiferal indices in paleoecology, stratigraphic geology division, Texas, U.S.A., EPR67-ER2047 p.
- Bernal, Gladys; Ruiz Ochoa, Mauricio A.; Piedrahita, María Teresa; Restrepo, Evanaam. 2008. Foraminíferos En Los Sedimentos Superficiales Del Sistema Lagunar De Cispatá Y La Interacción Río Sinú-Mar Caribe Colombiano. Boletín de Ciencias de la Tierra, Num. 23 Junio, 2008. Universidad Nacional de Colombia. 5-20 pp.
- Bignot, G., 1988. Los Microfósiles – Los Diferentes Grupos, Aplicaciones Paleobiológicas y Geológicas. Editora Paraninfo, Madrid, 284 p.
- Brückner, S., Mackensen, A., 2007. Organic matter rain rates, oxygen availability, and vital effects from benthic foraminiferal $\delta^{13}C$ in the historic Skagerrak, North Sea, Marine Micropaleontology, 10.
- Carbajal, N. Sousa, A. Y Durazo, R., 1997. A numerical model of the ex-ROFI of the Colorado River. Journal of Marine Systems, 12: 17-33.
- Carrquiry, J.D. y Sánchez, A., 1999. Sedimentation in the Colorado River Delta and Upper Gulf of California after nearly a century of discharge loss. Marine Geology 158, 125-145.
- Castro, R., M. F. Lavín y P. Ripa. 1994. Seasonal heat balance in the Gulf of California. Journal of Geophysical Research, 99(C2):3249-3261 p.
- Correa–Montero, S. L., 1997. Biofacies y Estructuras de las Comunidades Batiales de Foraminíferos Bentónicos Recientes en la Porción Sur del Golfo de México (Caribe Mexicano), Tesis de Licenciatura, Escuela Superior de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, Baja California, México, 59 p.
- Cupul-Magaña, A. L. 1994. Flujos de sedimentos en suspensión y de nutrientes en la cuenca estuarina del Río Colorado. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias Marinas. Universidad Autónoma de Baja California., Ensenada, Baja .California., México. 117 p.



- Flessa, K.W., Surge, D.; Dettman, D.L.; Téllez-Duarte, M.A.; Goodfriend, G.A.; y Zachos, J.C., 1997. Los isótopos de oxígeno en bivalvos marinos pueden ser utilizados para estimar la afluencia de agua del Río Colorado a su Delta. (Resumen) Memorias de la IV Reunión sobre Geología de la Península de Baja California, 6-9 de abril, UABC-sociedad Geológica Peninsular.
- Fontanier, C. Mackensen A. Jorissen F. J., Anschutz P., Licari L., Griveaud C. 2006. Stable oxygen and carbon isotopes of living benthic foraminifera from the Bay of Biscay: Microhabitat and seasonal variability. *Marine Micropaleontology* Vol. 58., 159-183 p.
- Galindo-Bect, M. S. 2003. Larvas y Postlarvas de Camarones Peneidos en el Alto Golfo de California y Capturas de Camarón con Relación al Flujo del Río Colorado. Tesis de Doctorado en Ciencias en Oceanografía Costera. Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, Baja California, México, 160.
- García-Hernández, 2007. Inventario y Caracterización de las descargas que afectan la salud de los ecosistemas del Delta del Río Colorado, México. Informe Final Proyecto CONACyT SEMARNAT 2002-C01-003. 20 p.
- Gilbert, G. K. 1885. The topographic features of lake shores. *Ann. Rep. U.S. Geol. Surv.*, 5, 75 – 123.
- Gilbert, G. K. 1890. Lake Bonnaville. *Mon. U.S. Geol. Surv.*, I, 1 – 438.
- Godínez-Sandoval, V. M. 1997. Condiciones antiestuarinas en el Alto Golfo de California. Tesis de Maestría en Ciencias en Oceanografía Física. Centro de Investigación Científica y de Estudios Superiores de Ensenada (CICESE), carretera Tijuana-Ensenada, Ensenada, B.C., México, 86 p.
- Goodwin DH, Flessa KW, Schöne BR, Dettman DL. 2001. Crosscalibration of daily increments, stable isotope variation and temperature in the Gulf of California bivalve mollusk *Chione cortezi*: Implications for paleoenvironmental analysis. *Palaios* 16:387–398.



- Greiner, O. G., 1970. Distribution of major benthonic foraminiferal groups on the Gulf of Mexico, *Micropaleontology*, Vol. 16, No. 1
- Grossman, E.L. y Ku, T.L. 1986. Oxygen and carbon isotope fractionation in biogenic aragonite: Temperature effects: *Chemical Geology (Isotope Geosciences Section)*, 59:59–74.
- Haq, B.U. y Boersma, A. 1978. *Introduction to marine micropalaeontology*. Elsevier North-Holland Inc., New York, 376 pp.
- Hickman, C. P. 1990. *Zoología – Principios Integrados*. 2a Edición, Interamericana. McGraw Hill. España. 1119 p.
- Hinojosa-Huerta, y O. Carrillo Guerrero, Y. 2010. La cuenca binacional del Río Colorado. *Las Cuencas Hidrográficas de México*, 180-187.
- Kowalewsky, M., Flessa, K.W. y Aggen, J.A., 1994. Taphofacies analysis of Recent shelly cheniers (beach ridges) northeastern Baja California. *Facies* 31: 209-242.
- Kowalewsky, M., Avila-Serrano, G., Flessa, K.W., y Goodfriend, G.A., 2000. dead Delta's former productivity: two trillion shells at the mouth of the Colorado River. *Geology*, 28: 1059-1062.
- Lavín, M. F., E. Beier y A. Badán. 1997. Estructura hidrográfica y circulación del Golfo de California: Escalas estacional e interanual. En: M. F. Lavín Ed. *Contribuciones a la Oceanografía Física en México*. Unión de Geofísica Mexicana. Monografía 3, 41-171 p.
- Lavín, M. F., V. M. Godínez and L.G. Alvarez.1998. Inverse-estuarine features of the Upper Gulf of California. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 47, 769-795 p.
- Lavín, M. F. y S. Organista. 1988. Surface heat flux in the Northern Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*, 93(C11):14033-14038 p.
- Lavín, M.F. y Sánchez, S., 1998. On how the Colorado River affected the hydrography of the Upper Gulf of California. *Continental Shelf Research*, 19: 1545-1560.



- Lipps, J. H., W. H. Berger, M. A. Bruzas, R. G. Douglas and C. A. Ross, 1979. Foraminiferal Ecology and Paleocology, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, U.S.A., 187 p.
- Mackensen, A., Hubberten, H.-W., Bickert, T., Fischer, G., Fütterer, D.K., 1993. $d^{13}C$ in benthic foraminiferal tests of *Fontbotia wuellerstorfi* (Schwager) relative to $d^{13}C$ of dissolved inorganic carbon in Southern Ocean deep water: implications for glacial ocean circulation models. *Paleoceanography* 6, 587– 610.
- Meckel, L. D. 1975. Holocene sand bodies in the Colorado Delta area, northern Gulf of California. In: Broussard MC (Ed) *Deltas, models for exploration*. Houston Geol Soc., Houston, 239-265 p.
- Miranda-Reyes F, Reyes-Coca S, García-López J. 1990. Climatología de la región noroeste de México. Parte I. Precipitación. Rep. Tec. EBA No. 3, Centro de Investigación Científica y de Estudios Superiores de Ensenada (CICESE), Ensenada, Baja California, México, 160 p.
- Mosiño, P. y E. García. 1974. The climate of México. In: Bryson R. A., Hare F. K. (eds) *World survey of climatology, vol.II: climates of North America*. Elsevier, New York.
- Palafox-Silva, L., 2011. Composición y Estructura de las Tanatocenosis de Foraminíferos Bentónicos Submareales en el Delta del Colorado. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, México. 35p.
- Phleger, F.B. y Lankford, R.R., 1957. Seasonal occurrences of living benthonic foraminifera in some Texas bays. *Cushman Foundation for Foraminiferal Research Contributions*, 8:93-105.
- Phleger, F.B., 1964. Patterns of living benthonic foraminifera. En: van Andel, T.J., Shor, G.G. (Eds.), *Marine Geology of the Gulf of California: A Symposium*. Am. Assoc. Petr. Geol. Mem. 3, 277-394.
- Radelli, L., 1997. *Invitación a la Geoquímica*, Universidad de Sonora, Departamento de Geología. Universidad de Sonora, México, 251 p.
- Reyes-García, C. y Andrade, J.L. 2007. Los isótopos estables del Hidrogeno y el Oxígeno en los estudios ecofisiológicos de las plantas. *Boletín de la Sociedad*



- Botánica de México, junio, número 80. Sociedad Botánica de México A.C. Distrito Federal, México. 19 – 28 pp.
- Roden, G. I. 1964. Oceanographic aspects of the Gulf of California. In: Andel TjH van, Shor G. G. Jr (Eds) Marine geology of the Gulf of California. A symposium. Am. Assoc. Petrol. Geol. Mem. 3, 30-58.
- Rodríguez, C.A., Flessa, K. W., Téllez-Duarte, M. A., Dettman, D. L., Avila-Serrano, G. E. 2001. Macrofaunal and isotopic estimates of the former extent of the Colorado River estuary, upper Gulf of California, México. *Journal of Arid Environments*. 49 (1) 183-193. doi:10.1006/jare.2001.0845.
- Rojas-Bracho, L. 1998. Evaluación genética y riesgo de endogamia en una especie endémica críticamente amenazada del Golfo de California: la vaquita (*Phocoena sinus* Norris y McFarland, 1958). Tesis doctoral, Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, BC, México, 113 pp.
- Ruvalcaba, I., 2005. Paleoecología de foraminíferos bentónicos del Pleistoceno en el Faro, Baja California, México. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, México. 83 p.
- Santamaría-del-Ángel, E., Álvarez-Borrego, S. and Muller-Karger, F.E. 1994. Gulf of California biogeographic regions based on coastal zone color scanner imagery. *J. Geophys. Res.*, 99(C4): 7411–7421.
- Santa Rosa-del Río, M.A., 2008. Estudio sobre la evolución del Delta del Po (Italia) con análisis sedimentológico y palinológico y comparación bibliográfica con el Delta del Ebro (España) durante el Cuaternario. Tesis de Maestría Universitat degli Studi di Ferrara, Italia. 93 p.
- Santa Rosa-del Río, M. A., Avila-Serrano, G. E., Téllez-Duarte, M. A., González-Yajimovich, O. E., Cupul-Magaña, L. A. 2011. Distribución y abundancia de tanatocenosis de foraminíferos bentónicos submareales en el Delta del Río Colorado. *Boletín de la sociedad Geológica Mexicana* Vol. 62, Num. 3., 429-442 p.
- Téllez-Duarte, M.A., Avila, G. Y Flessa, K., 2000. Significado paleoecológico de tanatocenosis de *Mulinia coloradoensis* en el Delta del Colorado. XII Congreso Nacional de Oceanografía, Huatulco, Oax., Libro de resúmenes, 137 p.



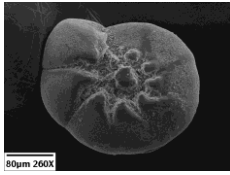
- Télez–Duarte, M. A., y Avila–Serrano, G. E., 2002. Significado ambiental de isótopos de oxígeno en el molusco bivalvo *Prothotaca grata* de sitios arqueológicos del noroeste de Baja California, En: Memorias del Tercer Encuentro Binacional Balances y Perspectivas, Antropología e Historia de Baja California.
- Télez-Duarte, M.A., Huerta, L., Rubalcaba, I., Avila, G., and Flessa, K.W. 2006. El $\delta^{18}\text{O}$ en foraminíferos bentónicos como indicador ambiental de la influencia del agua dulce en ambientes estuarinos: el caso del delta del río Colorado. Libro de resúmenes del X Congreso Nacional de Paleontología, Instituto de Geología, UNAM, México, D.F. 21-25 noviembre.
- Télez-Duarte, M.A., Avila-Serrano, G. and Flessa, K.W. 2008a. Los Concheros arqueológicos del Delta del Colorado y el uso sustentable de los recursos naturales. Memorias de balances y perspectivas de la historia de la Antropología e Historia de la Baja California 2000-2001. Instituto Nacional de Antropología, 1ª Ed. 2008, p. 10-14.
- Télez-Duarte, M. A., Avila-Serrano, G. and Flessa, K. W. 2008b. Environmental significance of oxygen isotopes in the bivalve *Prothotaca grata* from archaeological sites in northeast Baja California. Pacific Coast Archaeological Society Quarterly, 39 (4): 49-56 p.
- Thomas, W.H. y Simmons, E.G., 1960. Phytoplankton production in the Mississippi Delta. En: Recent sediments, northwest Gulf of Mexico. Am. Ass. Petr. Geologists Memoir: 103-116.
- Thompson, R.W., 1968. Tidal flat sedimentation on the Colorado River Delta, northwestern Gulf of California. Geol. Soc. Amer. Mem. 107, 133 p.
- Thompson, R. W. 1969. Bathymetry and sedimentation. En: Thomson, D. A., A. R. Mead, J. R. Schreiber Jr., J. A. Hunter, W. F. Savage y W. W. Rinne (Eds.). Environmental impact of brine effluents on Gulf of California. U. S. Dept. Interior, Office of Saline Water, Res. & Dev. Prog. Rep. 387, 72-82 p.



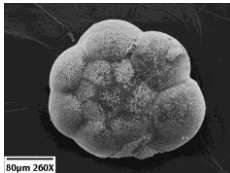
-
- Van Andel, T.H., 1964. Recent marine sediments of the Gulf of California. En: van Andel, T.J., Shor, G.G. (Eds.), *Marine Geology of the Gulf of California: A Symposium*. Am. Assoc. Petr. Geol. Mem. 3, 216-310.
- Walton, W. R., 1952. Techniques for the recognition of living foraminifera: *Cushman Found. Foram. Research, Contr.*, V. 3, pt. 2, 56 – 60 p.



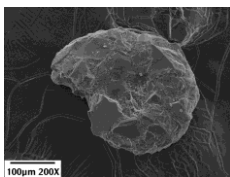
8. ANEXO



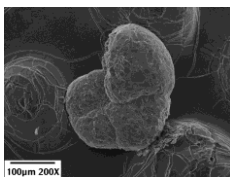
Orden: Foraminiferida (Eichwald, 1830)
 Suborden: Rotaliina (Delage and Hérouard, 1896)
 Familia: Ammoniidae (Saidova, 1981)
 Género: **Ammonia** (Brünnich, 1772)
 Especie: **beccarii** (Linné 1758)
 Subespecie: **parkinsoniana** (d'Orbigny, 1826)



Orden: Foraminiferida (Eichwald, 1830)
 Suborden: Rotaliina (Delage and Hérouard, 1896)
 Familia: Ammoniidae (Saidova, 1981)
 Género: **Ammonia** (Brünnich, 1772)
 Especie: **sp**



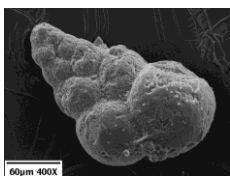
Orden: Foraminiferida (Eichwald, 1830)
 Suborden: Textulariina (Delage and Hérouard, 1896)
 Familia: Discamminidae (Mikhalevich, 1980)
 Género: **Ammoscalaria** (Höglund, 1947)
 Especie: **pseudospiralis** (Williamson)



Orden: Foraminiferida (Eichwald, 1830)
 Suborden: Rotaliina (Delage and Hérouard, 1896)
 Familia: Heterolepidae (González-Donoso, 1969)
 Género: **Anomalinoidea** (Brotzen, 1942)
 Especie: **sp**



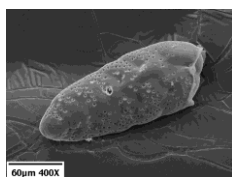
Orden: Foraminiferida (Eichwald, 1830)
 Suborden: Rotaliina (Delage and Hérouard, 1896)
 Familia: Bolivinidae Glaessner, 1937
 Género: **Bolivina** (d'Orbigny, 1839)
 Especie: **acutula**



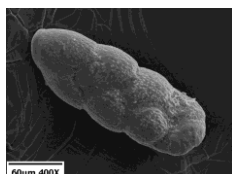
Orden: Foraminiferida (Eichwald, 1830)
 Suborden: Rotaliina (Delage and Hérouard, 1896)
 Familia: Bolivinidae Glaessner, 1937
 Género: **Bolivina** (d'Orbigny, 1839)
 Especie: **sp 1**

Imagen No
 Disponible

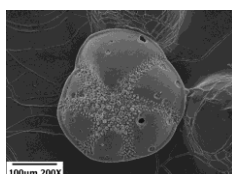
Orden: Foraminiferida (Eichwald, 1830)
 Suborden: Rotaliina (Delage and Hérouard, 1896)
 Familia: Bolivinidae Glaessner, 1937
 Género: **Bolivina** (d'Orbigny, 1839)
 Especie: **sp 2**



Orden: Foraminiferida (Eichwald, 1830)
 Suborden: Rotaliina (Delage and Hérouard, 1896)
 Familia: Bolivinidae Glaessner, 1937
 Género: **Bolivina** (d'Orbigny, 1839)
 Especie: **sp 3**



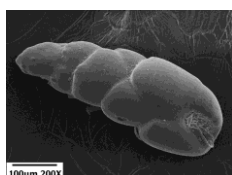
Orden: Foraminiferida (Eichwald, 1830)
 Suborden: Rotaliina (Delage and Hérouard, 1896)
 Familia: Bolivinidae Glaessner, 1937
 Género: **Bolivina** (d'Orbigny, 1839)
 Especie: **sp 4**



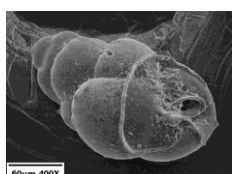
Orden: Foraminiferida (Eichwald, 1830)
 Suborden: Rotaliina (Delage and Hérouard, 1896)
 Familia: Trichohyalidae (Saidova, 1981)
 Género: **Bucella** (Bandy, 1950)
 Especie: **tenerrima**

Imagen No
 Disponible

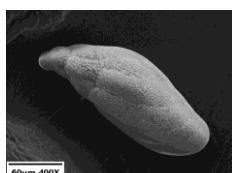
Orden: Foraminiferida (Eichwald, 1830)
 Suborden: Rotaliina (Delage and Hérouard, 1896)
 Familia: Buliminidae (Jones, 1875)
 Género: **Bulimina** (d'Orbigny, 1826)
 Especie: **colombianaensis**



Orden: Foraminiferida (Eichwald, 1830)
 Suborden: Rotaliina (Delage and Hérouard, 1896)
 Familia: Buliminidae (Jones, 1875)
 Género: **Bulimina** (d'Orbigny, 1826)
 Especie: **denudata**



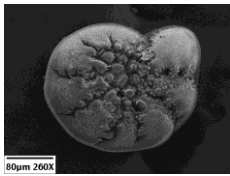
Orden: Foraminiferida (Eichwald, 1830)
 Suborden: Rotaliina (Delage and Hérouard, 1896)
 Familia: Buliminidae (Jones, 1875)
 Género: **Bulimina** (d'Orbigny, 1826)
 Especie: **marginata** (d'Orbigny, 1826)



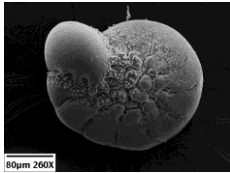
Orden: Foraminiferida (Eichwald, 1830)
 Suborden: Rotaliina (Delage and Hérouard, 1896)
 Familia: Turrilinidae (Cushman, 1927)
 Género: **Buliminella** (Cushman, 1911)
 Especie: **elegantissima** (d'Orbigny, 1826)



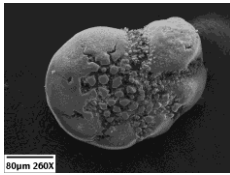
Orden: Foraminiferida (Eichwald, 1830)
 Suborden: Rotaliina (Delage and Hérouard, 1896)
 Familia: Baggininae (Cushman, 1927)
 Género: **Cancris** (de Montfort, 1808)
 Especie: **sp**



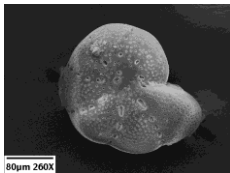
Orden: Foraminiferida (Eichwald, 1830)
Suborden: Rotaliina (Delage and Hérouard, 1896)
Familia: Elphidiidae (Galloway, 1933)
Género: **Cribroelphidium** (Cushman and Brönnimann 1948)
Especie: **excavatum** (Terquem, 1876)



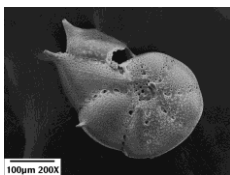
Orden: Foraminiferida (Eichwald, 1830)
Suborden: Rotaliina (Delage and Hérouard, 1896)
Familia: Elphidiidae (Galloway, 1933)
Género: **Cribroelphidium** (Cushman and Brönnimann 1948)
Especie: **gunteri** (Cole, 1931)



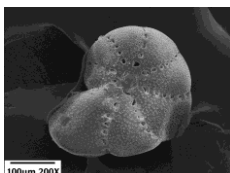
Orden: Foraminiferida (Eichwald, 1830)
Suborden: Rotaliina (Delage and Hérouard, 1896)
Familia: Elphidiidae (Galloway, 1933)
Género: **Cribroelphidium** (Cushman and Brönnimann 1948)
Especie: **incertum**



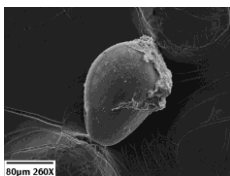
Orden: Foraminiferida (Eichwald, 1830)
Suborden: Rotaliina (Delage and Hérouard, 1896)
Familia: Elphidiidae (Galloway, 1933)
Género: **Cribroelphidium** (Cushman and Brönnimann 1948)
Especie: **poeyanum**



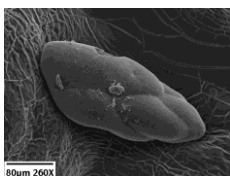
Orden: Foraminiferida (Eichwald, 1830)
Suborden: Rotaliina (Delage and Hérouard, 1896)
Familia: Elphidiidae (Galloway, 1933)
Género: **Cribroelphidium** (Cushman and Brönnimann 1948)
Especie: **spinatum**



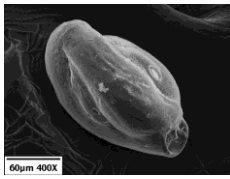
Orden: Foraminiferida (Eichwald, 1830)
Suborden: Rotaliina (Delage and Hérouard, 1896)
Familia: Elphidiidae (Galloway, 1933)
Género: **Cribroelphidium** (Cushman and Brönnimann 1948)
Especie: **spinatum var. Translucens**



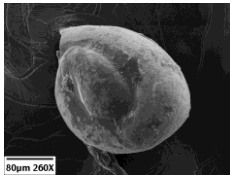
Orden: Foraminiferida (Eichwald, 1830)
Suborden: Lagenina (Delage and Hérouard, 1896)
Familia: Ellipsolagenidae (Silvestri, 1923)
Género: **Fissurina** (Reuss, 1850)
Especie: **sp**



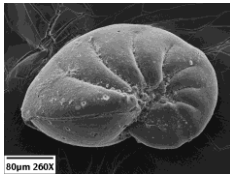
Orden: Foraminiferida (Eichwald, 1830)
Suborden: Globigerinina (Delage and Hérouard, 1896)
Familia: Fursenkoinidae (Loeblich and Tappan, 1961)
Género: **Fursenkoina** (Loeblich and Tappan, 1961)
Especie: **pontoni**



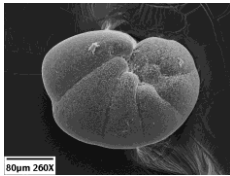
Orden: Foraminiferida (Eichwald, 1830)
 Suborden: Miliolina (Delage and Hérouard, 1896)
 Familia: Hauerinidae (Schwager, 1876)
 Género: **Pseudomassilina** (Lacroix, 1938)
 Especie: **sp**



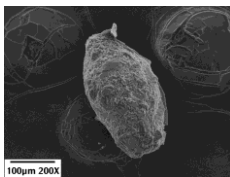
Orden: Foraminiferida (Eichwald, 1830)
 Suborden: Miliolina (Delage and Hérouard, 1896)
 Familia: Hauerinidae (Schwager, 1876)
 Género: **Miliolinella** (Wiesner, 1931)
 Especie: **sp**



Orden: Foraminiferida (Eichwald, 1830)
 Suborden: Rotaliina (Delage and Hérouard, 1896)
 Familia: Nonionidae (Schultze, 1854)
 Género: **Nonionoides** (Saidova, 1975)
 Especie: **basispinata**



Orden: Foraminiferida (Eichwald, 1830)
 Suborden: Rotaliina (Delage and Hérouard, 1896)
 Familia: Nonionidae (Schultze, 1854)
 Género: **Nonionoides** (Saidova, 1975)
 Especie: **stella**



Orden: Foraminiferida (Eichwald, 1830)
 Suborden: Textulariina (Delage and Hérouard, 1896)
 Familia: Ammosphaeroidininae
 Género: **Nouria** (Heron-Allen and Earland, 1914)
 Especie: **sp**

Imagen No
 Disponible

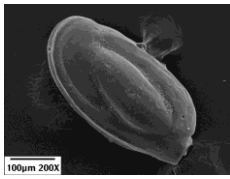
Orden: Foraminiferida (Eichwald, 1830)
 Suborden: Lagenina (Delage and Hérouard, 1896)
 Familia: Polymorphinidae (d'Orbigny, 1839)
 Subfamilia: Polymorphininae
 Género: **Globullina** (d'Orbigny, 1839)
 Especie: **sp**



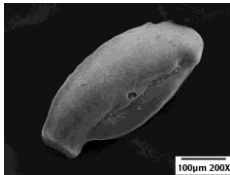
Orden: Foraminiferida (Eichwald, 1830)
 Suborden: Miliolina (Delage and Hérouard, 1896)
 Familia: Hauerinidae (Schwager, 1876)
 Género: **Quinqueloculina** (d'Orbigny, 1826)
 Especie: **exculpta**



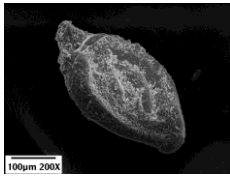
Orden: Foraminiferida (Eichwald, 1830)
 Suborden: Miliolina (Delage and Hérouard, 1896)
 Familia: Hauerinidae (Schwager, 1876)
 Género: **Quinqueloculina** (d'Orbigny, 1826)
 Especie: **poeyana** (d'Orbigny,)



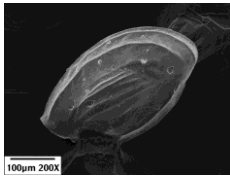
Orden: Foraminiferida (Eichwald, 1830)
Suborden: Miliolina (Delage and Hérouard, 1896)
Familia: Hauerinidae (Schwager, 1876)
Género: **Quinqueloculina** (d'Orbigny, 1826)
Especie: **sp1**



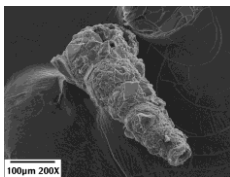
Orden: Foraminiferida (Eichwald, 1830)
Suborden: Miliolina (Delage and Hérouard, 1896)
Familia: Hauerinidae (Schwager, 1876)
Género: **Quinqueloculina** (d'Orbigny, 1826)
Especie: **sp2**



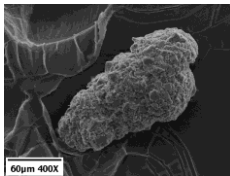
Orden: Foraminiferida (Eichwald, 1830)
Suborden: Miliolina (Delage and Hérouard, 1896)
Familia: Hauerinidae (Schwager, 1876)
Género: **Quinqueloculina** (d'Orbigny, 1826)
Especie: **sp3**



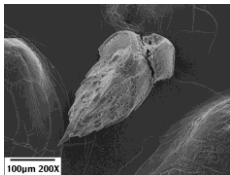
Orden: Foraminiferida (Eichwald, 1830)
Suborden: Miliolina (Delage and Hérouard, 1896)
Familia: Hauerinidae (Schwager, 1876)
Género: **Quinqueloculina** (d'Orbigny, 1826)
Especie: **sp4**



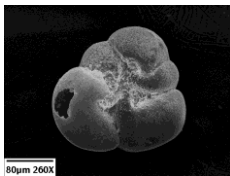
Orden: Foraminiferida (Eichwald, 1830)
Suborden: Textulariina (Delage and Hérouard, 1896)
Familia: Hormosinidae (Haeckel, 1894)
Género: **Reophax** (de Montfort, 1808)
Especie: **dentaliformis**



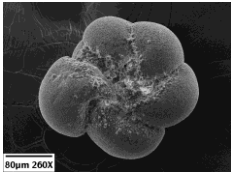
Orden: Foraminiferida (Eichwald, 1830)
Suborden: Textulariina (Delage and Hérouard, 1896)
Familia: Hormosinidae (Haeckel, 1894)
Género: **Reophax** (de Montfort, 1808)
Especie: **nanus**



Orden: Foraminiferida (Eichwald, 1830)
Suborden: Rotaliina (Delage and Hérouard, 1896)
Familia: Reussellidae (Cushman, 1933)
Género: **Reusella** (Galloway, 1933)
Especie: **sp**



Orden: Foraminiferida (Eichwald, 1830)
Suborden: Rotaliina (Delage and Hérouard, 1896)
Familia: Rosalinidae (Reiss, 1963)
Género: **Rosalina** (d'Orbigny, 1826)
Especie: **colombiensis**



Orden: Foraminiferida (Eichwald, 1830)
Suborden: Rotaliina (Delage and Hérouard, 1896)
Familia: Rosalinidae (Reiss, 1963)
Género: **Rosalina** (d'Orbigny, 1826)
Especie: **sp 1**