



**INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL**  
**CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS**



Variabilidad en la abundancia relativa de  
foraminíferos bentónicos: indicador de la calidad  
de los sedimentos en la Laguna de La Paz, Golfo  
de California

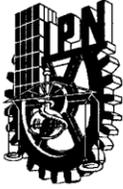
TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRÍA EN CIENCIAS  
EN  
MANEJO DE RECURSOS MARINOS

PRESENTA

ADRIANA ABIGAIL GÓMEZ LEÓN

LA PAZ, B.C.S. JUNIO, 2018



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARIA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**  
**ACTA DE REVISIÓN DE TESIS**

En la Ciudad de La Paz, B.C.S., siendo las 12:00 horas del día 13 del mes de Junio del 2018 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CICIMAR para examinar la tesis titulada:

**"VARIABILIDAD EN LA ABUNDANCIA RELATIVA DE FORAMINÍFEROS BENTÓNICOS:  
INDICADOR DE LA CALIDAD DE LOS SEDIMENTOS EN LA LAGUNA DE LA PAZ, GOLFO DE CALIFORNIA"**

Presentada por el alumno:

<b>GÓMEZ</b> Apellido paterno	<b>LEÓN</b> materno	<b>ADRIANA ABIGAIL</b> nombre(s)
Con registro: <b>B 1 6 0 7 8 9</b>		

Aspirante de:

**MAESTRIA EN CIENCIAS EN MANEJO DE RECURSOS MARINOS**

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA DEFENSA DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

**LA COMISION REVISORA**

Directores de Tesis

\_\_\_\_\_  
**DR. ALBERTO SÁNCHEZ GONZÁLEZ**  
Director de Tesis

\_\_\_\_\_  
**DRA. GRISELDA MARGARITA RODRÍGUEZ FIGUEROA**  
2ª. Directora de Tesis

\_\_\_\_\_  
**DRA. AIDA MARTÍNEZ LÓPEZ**

\_\_\_\_\_  
**DRA. ANA JUDITH MARMOLEJO RODRÍGUEZ**

\_\_\_\_\_  
**DRA. ALEJANDRA PIÑÓN GIMATE**

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

\_\_\_\_\_  
**DR. SERGIO HERNÁNDEZ TRUJILLO**



**I.P.N.  
CICIMAR  
DIRECCIÓN**



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL  
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

**CARTA CESIÓN DE DERECHOS**

En la Ciudad de La Paz, B.C.S., el día 20 del mes de Junio del año 2018

El (la) que suscribe GEOL. ADRIANA ABIGAIL GÓMEZ LEÓN Alumno (a) del Programa

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN MANEJO DE RECURSOS MARINOS

con número de registro B160789 adscrito al CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS

manifiesta que es autor(a) intelectual del presente trabajo de tesis, bajo la dirección de:

DR. ALBERTO SÁNCHEZ GONZÁLEZ Y DRA. GRISELDA MARGARITA RODRÍGUEZ FIGUEROA

y cede los derechos del trabajo titulado:

"VARIABILIDAD EN LA ABUNDANCIA RELATIVA DE FORAMINÍFEROS BENTÓNICOS:

INDICADOR DE LA CALIDAD DE LOS SEDIMENTOS EN LA LAGUNA DE LA PAZ, GOLFO DE CALIFORNIA"

al Instituto Politécnico Nacional, para su difusión con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Éste, puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: geology.adriana@gmail.com - alsanchez@ipn.mx - griselmarg@gmail.com

Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

  
GEOL. ADRIANA ABIGAIL GÓMEZ LEÓN

*Nombre y firma del alumno*

## **Agradecimientos**

Quiero agradecer primeramente a mis padres Manuela León Flores y Adrián Gómez Amador, por apoyarme siempre y tener una palabra con la que me motivan a seguir cumpliendo mis sueños y metas personales; a mi hermana Georgina Nereyda Gómez León, le agradezco que con ella he aprendido a ser mejor persona. De igual manera quiero agradecer a Gerardo Vázquez Rochín quien es mi soporte y consejero de vida.

A mi director de tesis el Dr. Alberto Sánchez González, por guiarme para culminar con éxito este proyecto. También a mi comité tutorial, Co-director Dra. Griselda M. Rodríguez Figueroa, Dra. Judith, Dra. Aida Martínez y Dra. Alejandra Piñón, gracias por su tiempo y correcciones para mejorar este trabajo.

A todos en el departamento de Oceanología, al Dr. Rafael, Dr. Enrique Nava, Dra. Yanette Murillo, gracias por apoyarme cuando necesite de una asesoría, prestarme las instalaciones del laboratorio para terminar mis resultados o una palabra que me diera ánimo.

A todos mis amigos de CICIMAR, Dra. Karen, Moy, Nancy, Casandra, Karla, Zenia, Gisela, Néstor, Julio, Ángel, Alejandro, Jan, Dr. Alejandro, gracias por hacer más alegres mis días.

## Índice

índice de figuras.....	I
índice de tablas .....	II
Resumen .....	III
Abstract .....	IV
1. Introducción .....	1
2. Antecedentes .....	3
2.1. Antecedentes generales .....	3
2.1.1 Foraminíferos Bentónicos .....	3
2.1.2 Factores que determinan la distribución de los foraminíferos bentónicos .....	4
2.1.3 Foraminíferos bentónicos (trazadores de actividad antropogénica) .....	5
2.2 Antecedentes Regionales .....	7
3. Características del Área de estudio .....	9
3.2. Características Ambientales .....	10
4. Planteamiento del Problema .....	13
4.1. Problemática y justificación.....	13
5. Hipótesis.....	14
6. Objetivos.....	14
6.1. Objetivo General .....	14
6.2. Objetivo General .....	14
7. Materiales y Métodos.....	15
7.1. Laboratorio.....	16
7.1.1. Análisis de tamaño de grano .....	16
7.1.2. Determinación del carbono orgánico .....	16
7.1.3 Análisis de foraminíferos.....	17
7.1.4 Índice de estrés de foraminíferos (FSI por sus siglas en inglés) .....	19
8. Resultados.....	20
8.1. Tamaño de grano.....	20
8.2. Carbono orgánico .....	22
8.3. Identificación de foraminíferos.....	24
9. Discusión .....	29
10. Conclusiones.....	38
11. Referencias.....	39

## Índice de Figuras

Figura 1. , ilustra la interacciones entre el alimento, oxígeno y tipo de habitad de los foraminíferos bentónicos dentro de los primeros centímetros del sedimento, (Tomada y modificada de Jorissen <i>et al.</i> 1995). .....	3
Figura 2. Laguna de La Paz en el estado de B.C.S y la distribución de lodos en 1985 (línea discontinua azul) y 2013 (línea discontinua roja) (Gómez-León <i>et al.</i> , 2018). Se muestran las zonas urbanas y agrícolas. Las flechas representan las corrientes residuales dentro de la laguna (Gómez <i>et al.</i> , 2003). .....	9
Figura 3. Porcentaje de carbono orgánico en 1985 para la laguna de La Paz (Green-Ruiz, 1986).....	12
Figura 4. Porcentaje de carbono orgánico en 2013 para la laguna de La Paz (Pérez-Tribouillier, 2014). .....	12
Figura 5. Ubicación de los 3 núcleos de sedimento recolectados en Laguna de La Paz, en el año 2017 .....	15
Figura 6. Secuencia de pasos para obtener los núcleos de sedimentos en campo. ....	15
Figura 7. Secuencia de pasos para obtener el tamaño de grano. A - 1 gr de sedimento de cada sección del núcleo. B- Reacción con hexametafosfato y acetona. C- Homogeneización de la muestra. D- Se agrega una alícuota al analizador de partículas. ....	16
Figura 8. Secuencia del procedimiento para análisis del carbono orgánico .....	17
Figura 9. Proceso de tamizado para las muestras de sedimento. A - 5 gr de sedimento de cada sección del núcleo. B - Tamizado de muestras. C- Secado de las muestras en un horno a 45°C. D- Muestra seca. ....	17
Figura 10. Separación e identificación de foraminíferos. A- Separación de los foraminíferos con la ayuda de un microscopio estereoscópico y un pincel humedecido. B- Los organismos son colocados en las placas micropaleontológicas para su identificación. C- Género <i>Quinqueloculina</i> .....	18
Figura 11. Perfil vertical del contenido (%) de limos y arcillas del núcleo NLPZ1. ....	20
Figura 12. Perfil vertical del contenido (%) de limos y arcillas del núcleo NLPZ2. ....	21
Figura 13. Contenido de arenas muy finas, limos y arcillas del núcleo NLPZ3 .....	22
Figura 14. Perfil vertical del contenido de carbono orgánico, con respecto a la profundidad del núcleo NLPZ1. ....	23
Figura 15. Perfil vertical del contenido de carbono orgánico con respecto a la profundidad del núcleo NLPZ1. ....	24
Figura 17. Abundancia relativa de los géneros de foraminíferos bentónicos con la profundidad del núcleo NLPZ2. ....	27
Figura 18. Abundancia relativa de los géneros de foraminíferos bentónicos con la profundidad del en el núcleo NLPZ3.....	28

Figura 19. Índice de estrés de foraminíferos (FSI por sus siglas en inglés) aplicado a los núcleos de la laguna de La Paz. Las barras de color corresponden con la escala de valores del índice (Dimiza *et al.*, 2016)..... 37

**Índice de tablas**

Tabla 1. Listado taxonómico de los géneros identificados en sedimentos de la Laguna de La Paz..... 25

## Resumen

El incremento en la demanda de bienes y servicios puede ocasionar un deterioro ambiental, por vertimiento de desechos de origen antropogénico. Por lo tanto, los foraminíferos bentónicos serán afectados por incremento de la actividad antropogénica. El objetivo del presente estudio fue determinar la variabilidad en la abundancia relativa de los foraminíferos bentónicos con la finalidad de conocer los posibles cambios en la calidad del ambiente sedimentario en la laguna de La Paz. Para ello se realizó la colecta de 3 núcleos de sedimento, en sitios donde se ha reportado cambio en la abundancia de foraminíferos bentónicos y carbono orgánico. Los núcleos de sedimento con una longitud de 43cm (NLPZ1), 42 (NLPZ2) y 25cm (NLPZ3), se seccionaron a cada 1 cm. Los foraminíferos bentónicos fueron separados y cuantificados con un microscopio estereoscópico. Se identificaron un total de 8 géneros *Ammonia*, *Elphidium*, *Quinqueloculina*, *Bolivina*, *Textularina*, *Peneroplis*, *Florilus*, *Polystomellina*. Determinando que la asociación *Ammonia-Elphidium*, representa más del 80% de la frecuencia relativa a lo largo del núcleo. La asociación *Ammonia-Elphidium*, fue dominante con el incremento de lodos que están relacionadas a un aumento en el carbono principalmente hacia las partes más superficiales del núcleo de la zona centro y del sur de la laguna, lo que sugiere un cambio ambiental hacia años recientes que se ve reflejado en la calidad de los sedimentos de la laguna de La Paz. El índice de estrés de foraminíferos (FSI), que considera la calidad de los sedimentos tomando en cuenta las abundancias de foraminíferos bentónicos, no tolerantes y tolerantes al estrés ambiental, indica que la calidad en los sedimentos de la laguna, han cambiado en los últimos años, disminuyendo esta característica, principalmente en la parte central y sur, donde se tiene la dominancia de géneros tolerantes al estrés (*Ammonia-Elphidium*).

## Abstract

The increase in the demand for goods and services can cause environmental deterioration, due to dumping of anthropogenic waste. Therefore, benthic foraminifera will be affected by an increase in anthropogenic activity. The objective of the present study was to determine the variability in the relative abundance of the benthic foraminifera with the purpose of knowing the possible changes in the quality of the sedimentary environment in the La Paz lagoon. For this purpose, the collection of three sediment cores was carried out, in places where there has been a change in the abundance of benthic foraminifera and organic carbon. The sediment cores with a length of 43cm (NLPZ1), 42cm (NLPZ2) and 25cm (NLPZ3), were sectioned at every 1 cm. The benthic foraminifera were separated and quantified with a stereoscopic microscope. A total of 8 genera *Ammonia*, *Elphidium*, *Quinqueloculin*, *Bolivina*, *Peneroplis Textularina*, *Florilus*, *Polystomellina* were identified. Determining that the *Ammonia-Elphidium* association represents more than 80% of the relative frequency along the nucleus. The *Ammonia-Elphidium* association was dominant with the increase of sludge that is related to an increase in carbon mainly towards the most superficial parts of the core of the central zone and the south of the lagoon, which suggests an environmental change towards recent years which is reflected in the quality of the sediments of the La Paz lagoon. The foraminifera stress index (FSI), which considers the quality of the sediments taking into account the abundances of benthic foraminifera, not tolerant and tolerant to environmental stress, indicates that the quality of sediments in the lagoon have changed in recent years, decreasing this characteristic, mainly in the central and southern part, where there is dominance of stress-tolerant genera (*Ammonia-Elphidium*).

## 1. Introducción

La contaminación de sedimentos alrededor de las áreas costeras es el resultado de las descargas de contaminantes (orgánicos e inorgánicos) puntuales, escorrentías de origen y actividades humanas relacionada con la industria, agricultura, desarrollo urbano, minería y otras actividades (Alves - Martins *et al.*, 2013). Los altos niveles de contaminación pueden ser dañinos y tener efectos tóxicos en el ecosistema marino, en los recursos bióticos, y ser críticos para la salud humana (Alyazichi *et al.*, 2014). La dispersión de los contaminantes en combinación con factores fisicoquímicos puede favorecer su acumulación. El tipo de sedimento fino, se considera un sumidero de contaminantes, por lo tanto, estos sedimentos contribuyen a la contaminación y pueden traer consecuencias perjudiciales para la fauna marina como en el caso de los microorganismos bentónicos que pueden presentar una interrupción en su crecimiento o cambios en su diversidad y abundancia (Alves *et al.*, 2013).

Los foraminíferos bentónicos son microorganismos que habitan en la zona costera, su distribución, diversidad y abundancia es dependiente de variables ambientales como (salinidad, temperatura, oxígeno disuelto, materia orgánica y tipo de sedimento) que determinan su hábitat (Murray, 1991). Si las variables ambientales son modificadas antropogénica o naturalmente, se presenta un cambio en la distribución y asociación de las comunidades de foraminíferos en el bentos (e.g., Vikas y Dwarakish, 2015). Específicamente, la variación en el contenido de materia orgánica y del tamaño de grano controlan la distribución de los foraminíferos bentónicos en ambientes costeros (Sen-Gupta, 2002). Los estudios ecológicos recientes sobre foraminíferos bentónicos, se han realizado con la finalidad de conocer cómo el desarrollo antropogénico ha modificado el ecosistema marino donde estos microorganismos habitan (Jones, 2013). Debido a su capacidad de adaptación y rápida respuesta a los cambios ambientales, los foraminíferos se han convertido en una herramienta para ser utilizada como trazadores ambientales (Diz y Francés, 2008; Leorri *et al.*, 2008; Uthicke y Nobes 2008; Donnici *et al.*, 2012; Ruiz *et al.* 2012; Gómez-León *et al.*, 2018). En el presente trabajo, se plantea el caso de estudio de laguna de La Paz, debido a que han incrementado las zonas urbanas a

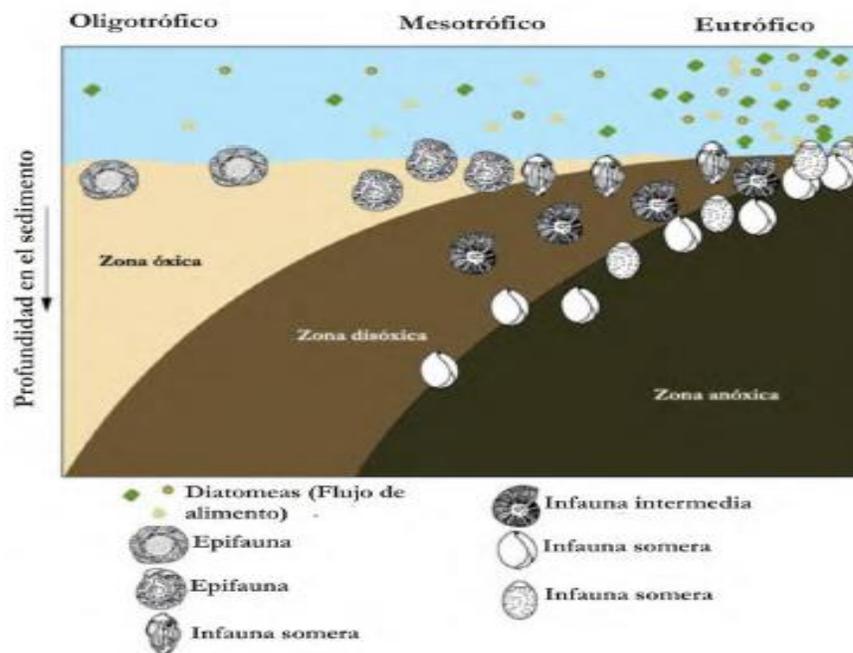
su alrededor está expuesta a contaminantes de origen antropogénico y generar un deterioro ambiental, como se han reportados en otras lagunas como Aveiro en Portugal (Alves - Martins *et al.*, 2015). Por lo tanto se utilizaron a los foraminíferos bentónicos como herramienta para identificar la calidad de los sedimentos de la laguna de La Paz, a través de los cambios en las abundancias relativas de las asociaciones de géneros tolerantes y no tolerantes al estrés ambiental (Dimiza *et al.*, 2016).

## 2. Antecedentes

### 2.1. Antecedentes generales

#### 2.1.1 Foraminíferos bentónicos

Los foraminíferos son organismos protozoos, con una concha o testa que puede ser aglutinada, calcárea o hialina (Haq y Boersma, 1978). Los foraminíferos hicieron su aparición hace 540 millones de años a principios del Cámbrico y sus descendientes han llegado hasta la era reciente, poblando mares y océanos desde la costa hasta zonas abisales (Murray, 2001; Murray, 2006; Sen-Gupta, 2002; Haq y Boersma, 1978). Se han descrito más de 10 000 especies actuales de foraminíferos (Sen-Gupta, 2002) entre las cuales existen especies bentónicas que viven en el fondo marino (Sedimento), formando parte de la epifauna e infauna, ambos grupos son delimitados por el agotamiento del oxígeno debido a la oxidación de la materia orgánica que es depositada al fondo marino. Por lo tanto, los niveles de oxígeno delimitan (Fig.1). La profundidad donde habitan los diferentes taxos de foraminíferos bentónicos (Haq y Boersma, 1978).



**Figura 1.** Ilustra la interacciones entre el alimento, oxígeno y tipo de habitat de los foraminíferos bentónicos dentro de los primeros centímetros del sedimento, (Tomada y modificada de Jorissen *et al.* 1995).

### **2.1.2 Factores que determinan la distribución de los foraminíferos bentónicos**

El controlan la distribución de los foraminíferos es una mezcla de variables (Murray, 2001; Murray, 2006; Sen-Gupta, 2002). Entre ellas se encuentran los siguientes:

**Carbono orgánico:** En las zonas con altos flujos de materia orgánica (zonas eutrofizadas), los foraminíferos endofaunales tienen su mayor abundancia, debido a que viven enterrados en el sedimentos y tienen una mayor tolerancia a los cambios en el nivel de oxígeno, a diferencia de las especies epifaunales que viven sobre el sedimento.

**Oxígeno:** Las especies bentónicas son extremadamente sensitivas a las condiciones de baja o alta concentración de oxígeno disuelto (OD). En regiones con baja concentraciones de OD, la mayoría de las especies tiende a desarrollarse con caparazones pequeños; mientras que, en las zonas con altas concentraciones de OD los foraminíferos desarrollan caparazones mayores a los 65  $\mu\text{m}$ .

**Temperatura:** Cada especie de foraminífero se adapta a un cierto intervalo de temperatura, el máximo para las especies de foraminíferos en los trópicos es de 45°C, mientras que para los climas polares es 0°C, como en el océano índico o antártico.

**Salinidad:** La mayoría de los foraminíferos bentónicos está adaptada a la salinidad marina promedio, aunque el intervalo de salinidad tolerado va de 0 hasta los 50, sin embargo, la diversidad más alta se encuentra en salinidades de 32-37.

**Sustrato:** Es uno de los factores determinantes para la distribución de las comunidades bénticas; siendo esto el resultado de diversos procesos de erosión y transporte, desde el continente hasta la cuenca de depósito; es dependiente de las condiciones hidrodinámicas del ambiente marino y de la producción *in situ* o de los aportes de MO, entre otros factores. Las comunidades de foraminíferos se adaptan y pueden vivir en los diferentes tipos de sustratos; en sustratos limo-arcillosos ricos en materia orgánica, suelen predominar especímenes de tamaño grande y formas

alargadas, a diferencia de un sustrato arena-grava, donde los foraminíferos suelen crecer con concha más gruesa y ornamentada (mayores a los 65  $\mu\text{m}$ ).

**Alimento y Depredadores:** Los foraminíferos son micro-omnívoros en los sistemas marinos. Se alimentan de invertebrados, algas, protistas y bacterias pequeñas, algunos también son carroñeros, alimentándose de la materia orgánica. Cuando se encuentra una alta diversidad de especies, existe una amplia distribución y concentración de recursos alimenticios, típico de los hábitats estables. Si hay fluctuaciones estacionales en el suministro de alimento, puede reflejarse en una baja diversidad de especies con rápida madurez y tamaño pequeño. De igual manera su distribución se ve afectada por la depredación de gusanos, crustáceos, gasterópodos y peces que viven en el sedimento.

### **2.1.3 Foraminíferos bentónicos (trazadores de actividad antropogénica)**

En la actualidad se realizan estudios en foraminíferos bentónicos con el fin de conocer e interpretar las probables causas del deterioro ambiental en los ambientes marinos transicionales. Los principales trabajos se sustentan parcialmente en estudios de la microfauna bentónica, la cual puede ser usada para inferir procesos y relaciones ecológicas, así como el impacto de las variaciones ambientales naturales y/o por efecto antropogénico sobre las comunidades bióticas en dichas zonas (Diz y Francés, 2008; Leorri *et al.*, 2008; Uthicke y Nobes 2008; Donnici *et al.*, 2012; Ruiz *et al.*, 2012). Las asociaciones de foraminíferos pueden revelar cambios en la calidad del hábitat y para tomar a una especie como un bioindicador se requiere de un conocimiento previo de su comportamiento en condiciones normales y su adaptación a las variaciones naturales o antropogénicas, que permita comparar las condiciones pasadas y las condiciones posteriores a una perturbación ambiental (Vargas-Cañas, 2011). Un ejemplo es el estudio realizado en las costas de la India donde se utilizan a los foraminíferos bentónicos como indicadores ambientales (Jayaraju *et al.*, 2011). Las principales especies que se identificaron en este trabajo fueron *Ammonia beccarii*, *Elphidium crispum*. Según lo reportado por el autor *Ammonia beccarii* presentó deformidades en sus conchas y una mayor abundancia en el área de estudio asociado a la contaminación por metales pesados o residuos urbanos. Otro caso localizado en

el Este del Mediterráneo examinó la calidad de los sedimentos a través las asociaciones de foraminíferos bentónicos y documento el dominio de especies como *Ammonia tepida* y *Bulimina spp* consideradas especies tolerantes al estrés en la bahía de Elefsis asociadas con concentraciones altas de materia orgánica y metales traza (Dimiza *et al.*, 2016). Mientras que, en otras localidades de la bahía menos contaminadas, estuvieron dominados por una mezcla de especies tolerantes y sensibles (*Bolivina spp* y *Peneroplis pertusus*) a la contaminación. Estos autores proponen como herramienta para medir la calidad de los sedimentos el índice de estrés para foraminíferos (FSI acrónimo en inglés) el cual se basa en los porcentajes relativos de especies agrupadas de acuerdo a su tolerancia/sensibilidad al enriquecimiento de materia orgánica donde se obtienen cinco estados ecológicos (de malo a excelente calidad). En un estudio en el estuario de Nellore en la India donde se compararon estaciones pre y post-monzon, y la respuesta de los foraminíferos bentónicos a diferentes parámetros ambientales, encontraron que *Ammonia*, el género con mayor abundancia y que predominó durante las condiciones post-monzónicas presentó deformaciones en sus conchas, donde se presentaron los porcentajes más altos de componentes orgánicos e inorgánicos. Algunas especies como *Quinqueloculina*, *Spiroloculina* no toleran estas condiciones y estuvieron ausentes durante este periodo.

En la laguna de Bizerte, Tunez se realizó el estudio de su estado trófico con base en el contenido de materia orgánica y el impacto en la microfauna bentónica de las asociaciones de foraminíferos, la cual estuvo dominada por géneros de *Bolivínidos*, *Bulimínidos*, *Nonionella spp* y *Nonionoides spp* que toleran porcentajes altos de materia orgánica en el sedimento, variable importante a considerar en estudios de monitoreo ambiental en la zona costera (Alves *et al.*, 2016). La tolerancia de los foraminíferos bentónicos al estrés ambiental fue evaluada en la costa de Egipto, utilizando 3 núcleos cercanos a la costa (Alejandría, Port y Suez, Egipto). La fauna comparada entre los sitios de muestreo estuvo dominada por *Ammonia*, *Adelosina*, *Elphidium*, los cambios en las abundancias de estos géneros indican que el sitio más afectado por contaminación es Suez, que estuvo dominado por la asociación *Ammonia-Elphidium*. Este sitio recibe cantidades importantes de contaminantes industrial, doméstico y agrícola (Badawi y Waffa, 2016). En el caso de la laguna de

Burrulus, Egipto se identificaron especies como *Ammonia tepida*, *Elphidium excavatum*, *Quinqueloculina seminula*, siendo *A. tepida* la especie más abundante, en condiciones de baja salinidad y presentar severa deformación y un cambio en la dirección de su enrollamiento como reflejó de las condiciones de contaminación por Cd y Cu (Orabi *et al.*, 2017). Frente a la costa de Israel se estudió el efecto del gradiente eutrófico en los foraminíferos bentónicos, dando como resultado una disminución de abundancia del 50 % en todas las estaciones en el intervalo de 2003 a 2012, debido a la descarga constante de materia orgánica (Roni *et al.*, 2017).

## **2.2 Antecedentes Regionales**

### **2.2.1 Foraminíferos bentónicos en el Golfo de California y Laguna de La Paz**

En el Golfo de California, Phleger (1963, 1964) realizó los primeros estudios de foraminíferos bentónicos donde determinó su distribución y su relación con las propiedades fisicoquímicas y la batimetría. Fue hasta la época de los 90's cuando se realizó un estudio del conjunto de foraminíferos bentónicos en dos núcleos del lecho marino en la parte oriental de la boca del Golfo de California, donde se diferenciaron tres biofaces de foraminíferos bentónicos asociadas a las condiciones físicas de la columna de agua, donde se describieron las masas de agua presentes en la boca del Golfo de California (Rozo-Vera, 1992). Estudios más recientes en el Alto Golfo de California comparan los cambios espaciales y temporales en la composición y estructura de las comunidades de tanatocenosis de foraminíferos bentónicos, durante el verano, otoño e invierno del 2009 y la primavera del 2010, la comunidad de foraminíferos bentónicos estuvo dominada por los géneros *Ammonia*, *Criboelphidium* y *Rosalina* indicando que la mayor abundancia de estos géneros fue durante la primavera (Santa Rosa-del Rio *et al.*, 2011). Mientras que, en la cuenca de Wagner, Alto Golfo de California, los foraminíferos bentónicos no mostraron variaciones en condiciones de pH bajo, manteniendo la misma tasa de calcificación (Pettit *et al.*, 2013).

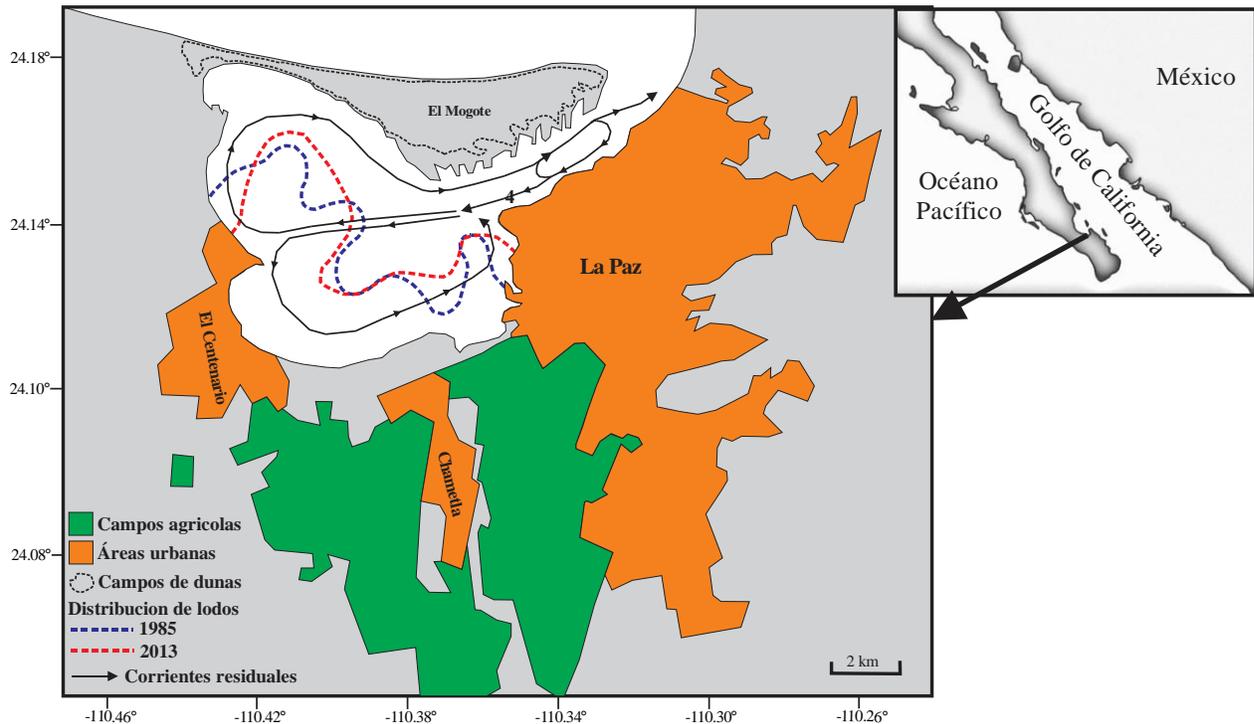
En la laguna de La Paz, se tiene el estudio de identificación y distribución foraminíferos bentónicos de (Segura-Vernis y Carreño, 1991) quienes determinaron las biofacies siguientes: (1) Marino-lagunar con influencia de mar abierto, y (2) lagunar interno con poca o nula influencia oceánica. (Gómez-León *et al.* 2018) contrastaron la

distribución de los foraminíferos bentónicos de 2013 y de 1985 (Segura-Vernis y Carreño, 1991) concluyendo que los géneros tolerantes al estrés como *Ammonia* y *Elphidium* incrementaron su abundancia relativa y distribución en respuesta al incremento de materia orgánica, que es la única variable que se ha reportado con aumento de 1% a >3% de carbono orgánico de 1985 a 2013 (Green-Ruiz, 1986; Pérez-Tribouillier, 2014) asociado posiblemente con el aumento de bienes y servicios, derivado de las actividades antropogénicas en áreas cercanas a la laguna, lo cual ha ocasionado un deterioro en la calidad de los sedimentos y del ambiente bentónico.

### 3. Características del Área de estudio

La laguna de la Paz, localizada en la parte sur-central del estado de Baja California Sur es un cuerpo costero somero con profundidades menor a 10 m, superficie aproximadamente de 45 km<sup>2</sup> y está conectado a la bahía de La Paz por un canal de mareas de 3 km de largo y 1.5 km de ancho (Gilmartin y Relevante, 1978) (Fig. 2).

Las precipitaciones escasas ocurren de junio a octubre y no exceden los 200 mm año<sup>-1</sup> (Cruz-Falcón *et al.*, 2007). En el invierno, los vientos provienen del noroeste con velocidad media de 2 a 3 ms<sup>-1</sup> y rachas de 10 ms<sup>-1</sup>; durante el verano, los vientos vienen del sur con intensidad promedio de 2 a 4 ms<sup>-1</sup> (Robles-Gil-Mester, 1998).



**Figura 2.** Laguna de La Paz en el estado de B.C.S y la distribución de lodos en 1985 (línea discontinua azul) y 2013 (línea discontinua roja) (Gómez-León *et al.*, 2018). Se muestran las zonas urbanas y agrícolas. Las flechas representan las corrientes residuales dentro de la laguna (Gómez *et al.*, 2003).

### **3.1. Patrón de circulación**

La influencia de las mareas semidiurnas (con un rango de marea entre 0.5 y 4.0 m) extiende su influencia en toda la laguna de La Paz (Salinas-González, 2000). En pleamar el principal rasgo dominante es la presencia de canales, a través de los cuales se genera un patrón de circulación en tres direcciones: uno hacia el sur del sistema, otro se interna hasta girar a la izquierda a la altura del Comitán y el tercer flujo con dirección al Estero Zacatecas. En reflujo o bajamar, de acuerdo con (Morales y Cabrera-Muro, 19 hay una sola dirección (oeste-este) de salida por la parte sur hacia el canal principal (Fig.2).

### **3.2. Características Ambientales**

#### **Temperatura**

La temperatura del agua de mar para el verano de 1985 tiene una variación de 4°C dentro de la laguna. La parte noroeste tiene una temperatura de 30°C y la parte suroeste registro temperatura de 26°C. Para el invierno el mismo autor menciona que la temperatura desciende a 20°C, siendo los meses más fríos enero y febrero (Cervantes-Duarte *et al*, 2001).

#### **Salinidad**

Los valores promedio salinidad en la laguna de La Paz es de 35ppm, en el verano oscilan entre 37 a 33 (Cervantes-Duarte *et al.*, 2001). (Segura-Vernis y Carreñ, 1991) reportaron valores mínimos de 32 en la región de punta Comitán y máximo de 39 hacia la zona de Chametla. La salinidad en la laguna de La Paz puede variar por la irradiación solar, vientos y la advección de aguas de la zona oceánica adyacente (Cervantes-Duarte *et al.*, 2001).

## **pH**

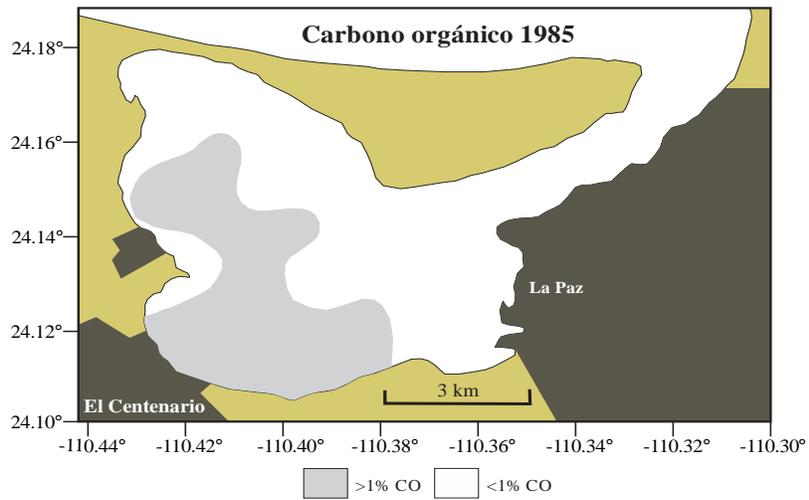
Debido a la poca información de pH en el agua superficial de la laguna de La paz, se muestra solamente los datos reportados por (Segura-Vernis y Carreño, 1991). Dichos autores muestran valores menores (8.0) en la parte suroeste de la laguna, mientras que el valor mayor (8.3) se localiza en la parte noroeste de la laguna. De manera general, los valores de pH menores se presentan hacia la zona sureste y suroeste de la laguna.

## **Tipo de sedimento**

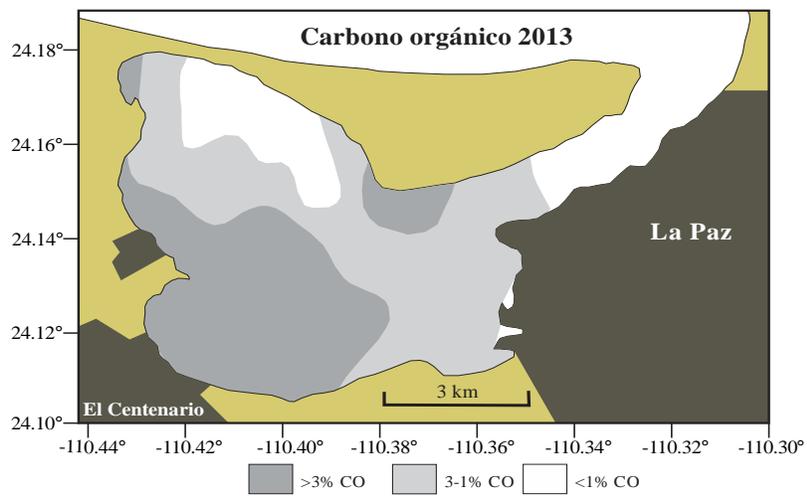
La composición de los sedimentos en la laguna es dividida por Espinoza-Avalos, (1979) en cuatro zonas: 1) zona de sedimento fangoso y detritos; 2) zona de sedimento fangoso con presencia de cieno; 3) zona de sedimento arenoso y fangoso; y 4) zona de sedimento tipo marga y arena. Sin embargo, Green-Ruiz (1986) reclasifica a la laguna en cuatro zonas: 1) zona con predominancia de material arenoso; 2) zona con lodos y arenas; 3) zona con sedimento arenoso y presencia de lodos con alto contenido de materia orgánica; y 4) zona con predominancia de sedimento fangoso con alto contenido de materia orgánica. Gómez-León *et al.* (2018) indican que el contenido de lodos no ha cambiado en el periodo de 1985 a 2013.

## **Materia orgánica**

Los porcentajes de carbono orgánico en el sedimento superficial de la laguna fueron de 2% hacia la parte suroeste de laguna y en la parte externa de la laguna el contenido de materia orgánica fue menor a 1% en 1985 (Green-Ruiz, 1986; Fig. 4). En el 2013, el carbono orgánico mostró un incremento con respecto de 1985, así mismo, la distribución espacial del carbono orgánico fue más amplia en 2013 con respecto a 1985 (Pérez-Tribouillier, 2014; Figs. 3 y 4).



**Figura 3.** Porcentaje de carbono orgánico en 1985 para la laguna de La Paz (Green-Ruiz, 1986).



**Figura 4.** Porcentaje de carbono orgánico en 2013 para la laguna de La Paz (Pérez- Tribouillier, 2014).

## **4. Planteamiento del Problema**

### **4.1. Problemática y justificación**

La laguna de La Paz es ecológicamente importante debido a que alberga especies endémicas de la región, además de contar con pequeñas zonas de manglar que en conjunto deben ser consideradas como zonas prioritarias de conservación, y junto con la bahía del mismo nombre se localizan dentro de uno de los sistemas marinos más productivos en el Golfo de California. Adicionalmente, las condiciones morfológicas y oceanográficas la proyectan como una zona atractiva para el desarrollo de diferentes proyectos urbanos, que podrían ocasionar un gran impacto sobre el ambiente. Para monitorear las transformaciones ambientales y ecológicas de este cuerpo de agua costero, entre otros proyectos, es necesario realizar estudios de las asociaciones de la microfauna como los foraminíferos bentónicos ya que estos organismos son ampliamente utilizados como bioindicadores del deterioro ambiental.

La diversidad y abundancia de estos microorganismos tiene una relación con las condiciones ambientales de su hábitat naturales y/o inducidas por el hombre. De acuerdo a esta relación, los foraminíferos bentónicos son estudiados a detalle para identificar y obtener información sobre la calidad del ambiente, ecología y otros aspectos relacionados con las condiciones hidrodinámicas y química del océano.

En el área de estudio, existen pocos antecedentes sobre los foraminíferos bentónicos, uno de ellos realizado 1985 y otro en 2013, en el cual se observó que la fauna bentónica presentaba cambios en su distribución, diversidad y abundancia, indicando un posible cambio ambiental, ya que la población en la ciudad de La Paz se ha incrementado en 140% (de 121184, habitantes en 1980 a 290288, habitantes en 2010; INEGI, 2010), lo cual pudo generar un impacto antropogénico en la laguna, debido a su cercanía con esta ciudad. Por lo tanto, en este estudio se pretende identificar e interpretar, si existe un cambio ambiental en la calidad de los sedimentos de la laguna de La Paz y si está relacionado con el crecimiento urbanístico de dicha ciudad.

## **5. Hipótesis**

El incremento de las actividades antropogénicas ocasiona cambios en la distribución y abundancia de los foraminíferos bentónicos en la Laguna de La Paz.

## **6. Objetivos**

### **6.1. Objetivo General**

Identificar los cambios en las abundancias y distribución de los foraminíferos bentónicos en la Laguna de La Paz.

### **6.2. Objetivos particulares**

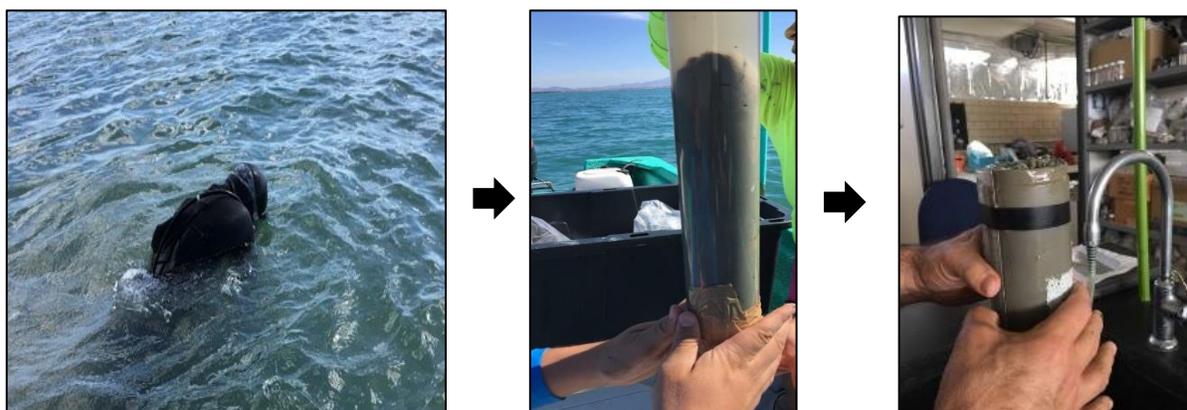
- Determinar la granulometría, para identificar su relación con la distribución de los foraminíferos bentónicos.
- Determinar el carbono orgánico, para identificar su relación y posible efecto en la distribución de los foraminíferos bentónicos.
- Determinar las abundancias de los géneros de foraminíferos bentónicos, para identificar cambios en la calidad de los sedimentos.

## 7. Materiales y Métodos

El muestreo se realizó en la laguna de La Paz, en donde se recolectaron 3 núcleos de sedimento durante el mes de abril de 2017 (Fig. 5). Los núcleos se recolectaron mediante buceo libre usando un tubo de policarbonato, los cuales miden aproximadamente 40 centímetros (Fig. 6). Posteriormente los núcleos fueron seccionados cada centímetro y resguardados en el Laboratorio de Química Marina del CICIMAR para su respectivo análisis.



**Figura 5.** Ubicación de los 3 núcleos de sedimento recolectados en Laguna de La Paz, en el año 2017

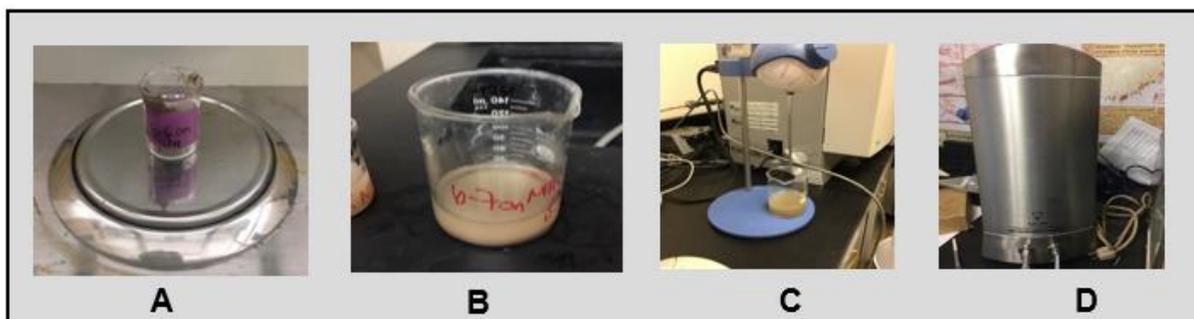


**Figura 6.** Secuencia de pasos para obtener los núcleos de sedimentos en campo.

## 7.1. Laboratorio

### 7.1.1. Análisis de tamaño de grano

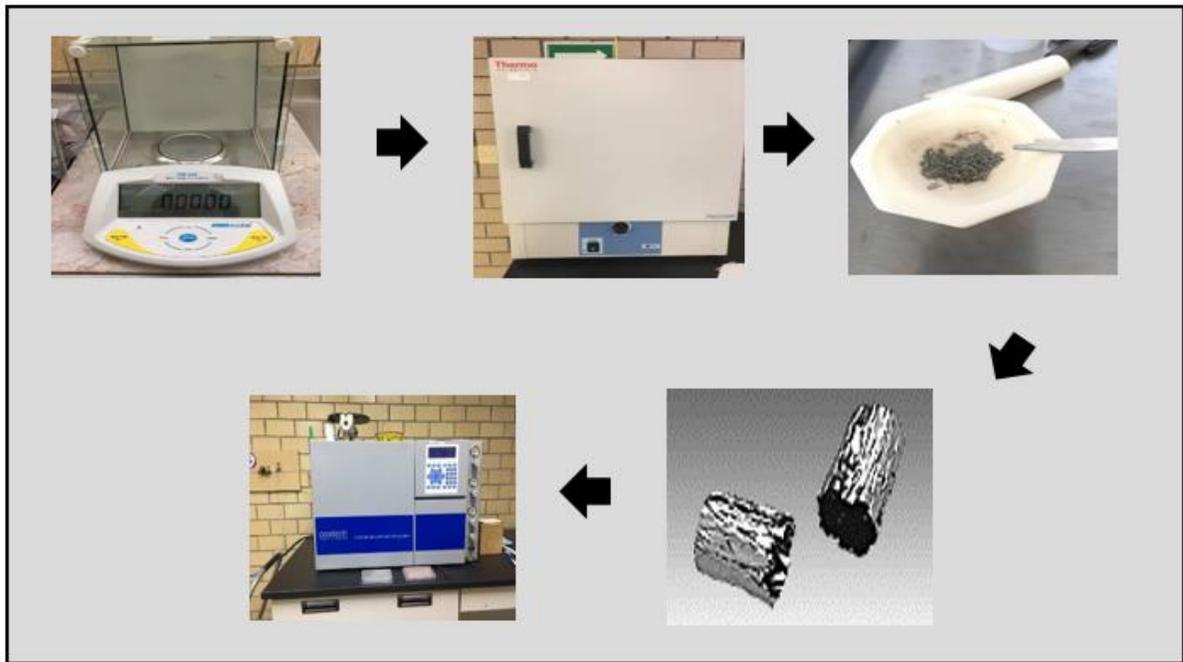
Para caracterizar el tipo de sedimento se utilizó el método de granulometría por difracción laser, que consiste en separar aproximadamente 1 gramo de sedimento, en cada sección de los núcleos. Posteriormente se agregan 20 ml de hexametáfosfato y 10 ml de acetona, esta última para eliminar un poco la materia orgánica y evitar agregados, después se homogeneiza y se deja reposar por 24 h, la muestra se vuelve a homogeneizar y se lleva al analizador de partículas con una pipeta (Fig. 7).



**Figura 7.** Secuencia de pasos para obtener el tamaño de grano. A - 1 gr de sedimento de cada sección del núcleo. B- Reacción con hexametáfosfato y acetona. C- Homogeneización de la muestra. D- Se agrega una alícuota al analizador de partículas.

### 7.1.2. Determinación del carbono orgánico

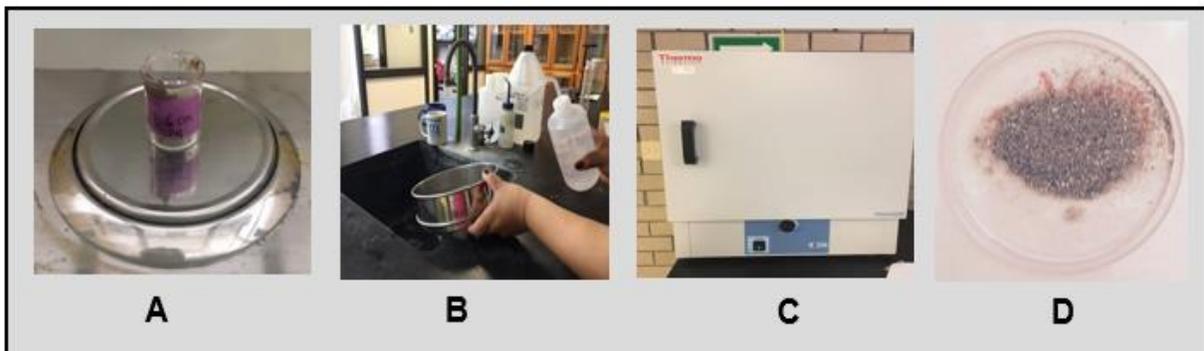
Las submuestras de 50 gr de sedimento se pusieron a secar a una temperatura de 50°C por 24 h, ya secos los sedimentos se homogeneizaron con la ayuda de un mortero. Posteriormente se colocaron 7 mg de sedimento pulverizado en cápsulas de estaño. Mediante el método de combustión se oxida la materia orgánica a una temperatura de aproximadamente 1000°C en un analizador elemental para obtener el valor del carbono orgánico total (Fig. 8).



**Figura 8.** Secuencia del procedimiento para análisis del carbono orgánico.

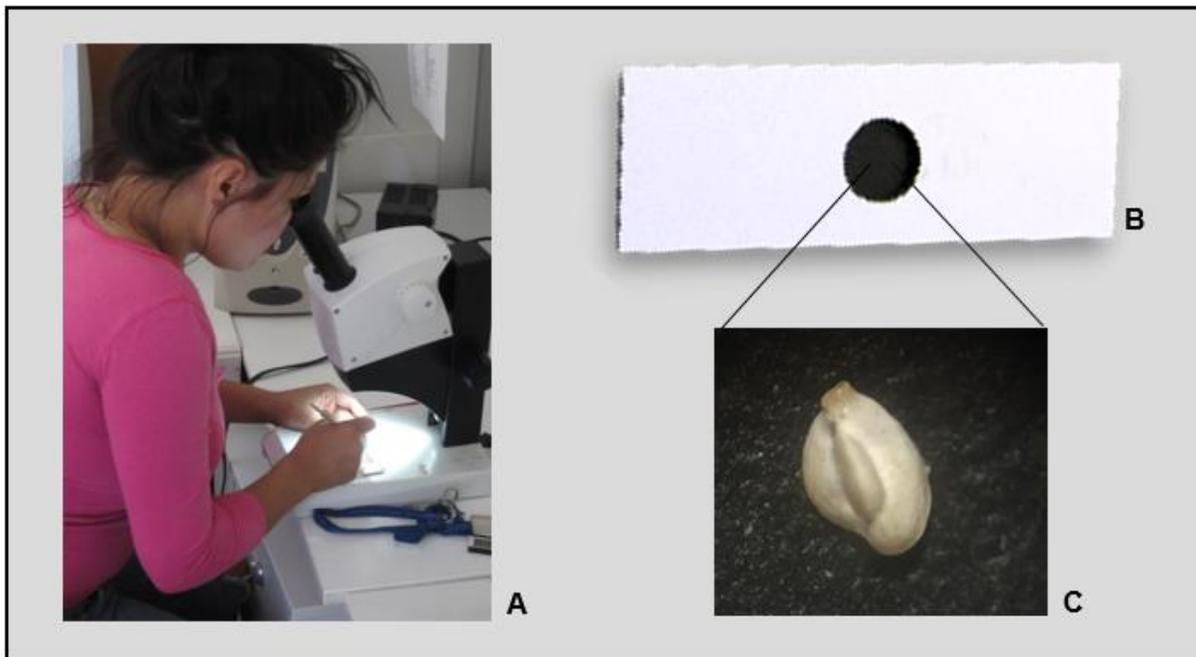
### 7.1.3 Análisis de foraminíferos

Para el análisis de los foraminíferos se tamizaron 5 g de sedimento húmedo con malla de 63  $\mu\text{m}$ ; debido a que el mayor número de foraminíferos bentónicos se concentra en tamaños finos del sedimento (Schröder, 1987). Después del tamizado a las muestras se les agregó hexametáfosfato para evitar agregados de sedimento, posteriormente fueron secados en un horno a una temperatura de 45°C por 24 h (Fig. 9).



**Figura 9.** Proceso de tamizado para las muestras de sedimento. A - 5 gr de sedimento de cada sección del núcleo. B - Tamizado de muestras. C- Secado de las muestras en un horno a 45°C. D- Muestra seca.

Para la identificación de los foraminíferos, de cada muestra se separaron 100 individuos; este número se considera estándar para determinar la variabilidad de los géneros de foraminíferos (Fatela y Taborda, 2002). Con la ayuda de un microscopio estereoscópico y un pincel humedecido se colocaron los foraminíferos en placas micropaleontológicas, para realizar el conteo e identificación de los géneros (Fig.10). Se utilizó una guía para la determinación de especies y posteriormente se comparó con las determinadas en el área de estudio por Segura-Vernis y Carreño (1991); de igual manera los resultados fueron comparados con los trabajos de Barker (1960), Phleger (1960), Haq y Boersma (1978), Boltovskoy e Hincapié-Martínes (1983).



**Figura 10.** Separación e identificación de foraminíferos. A- Separación de los foraminíferos con la ayuda de un microscopio estereoscópico y un pincel humedecido. B- Los organismos son colocados en las placas micropaleontológicas para su identificación. C- Género Quinqueloculina.

#### 7.1.4 Índice de estrés de foraminíferos (FSI por sus siglas en inglés)

Este índice es propuesto por (Dimiza *et al*, 2016) Este se obtiene de la siguiente formula:

$$FSI = (10 * Sen) + (Str)$$

Donde se consideran las abundancias relativas de los géneros “sensibles” (Sen) y los tolerantes al estrés (Str).

Considerando (Sen): Toda especie que es sensible a enriquecimiento orgánico y que está presente en ecosistemas no contaminados, desaparecen o ocurren en bajas proporciones. Este grupo incluye principalmente taxones epifaunales, que habitan en la superficie, a menudo asociados con sedimentos de grano grueso, como *Anfitegina*, *Sorites* y los miliolidos como las *Quinqueloculinas* y *Peneropli* considerado este último grupo muy sensible al enriquecimiento orgánico (Murray, 2001; Murray, 2006; Dimiza *et al*, 2016).

Considerando (Str): A los taxones tolerantes al estrés y viven bajo condiciones inalteradas, pero debido a que son tolerantes con la variabilidad ambiental, pueden actuar de manera oportunista y aumentar sus abundancias relativas en comparación con los taxones más sensibles (Murray, 2001; Murray, 2006; Alves - Martins *et al.*, 2013; Dimiza *et al*, 2016). Este grupo incluye principalmente especies de fauna poco profundas e intermedias a profundas, asociadas con sedimentos de grano fino. El género *Ammonia* es común en los suelos marinos poco profundos y muestra un comportamiento oportunista y un alto potencial para sobrevivir con altos contenidos de materia orgánica y metales (Alves - Martins *et al.*, 2013; Dimiza *et al*, 2016). Otros géneros tolerantes son *Bulimina*, *Bolivina*, *Melonis*, *Valvulineria*, *Cassidulina*, *Hyalinea*, *Hanzawaia*, *Globocassidulina*, *Rectuvigerina*, *Nonionella*, *Nonion* y *Fursenkoina*.

FSI: De este índice se obtiene un valor de 1 a 10, siendo 0 solo cuando el sedimento es azoico (todos los grupos son cero), 1-2 se consideran calidad de sedimento (Pobre), 2-5 (Moderado), 5-9 (bueno) y 10 (Alto), valores propuesto por (Dimiza *et al*, 2016).

## 8. Resultados

Para examinar la variación en los cambios en la distribución de los foraminíferos bentónicos en la Laguna de La Paz, en esta sección se muestran los resultados de los 3 núcleos de sedimentos, los cuales se presentan de la siguiente manera: I) Análisis del tamaño de grano, II) Contenido y distribución del carbono orgánico y III) Identificación de foraminíferos.

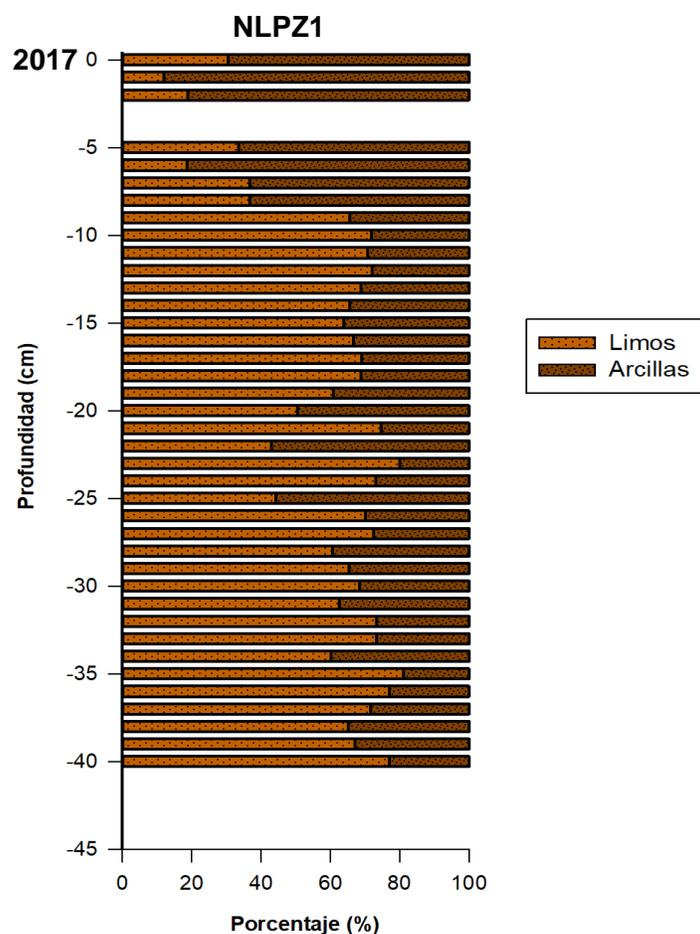
Los núcleos colectados fueron de diferente longitud, de 41 cm (NLPZ1), 40cm (NLPZ2) y 25 cm (NLPZ3). La variación en la dimensión fue debida a las características físicas de la zona de donde se extrajeron (Fig. 5).

### 8.1. Tamaño de grano

#### 8.1.1 NLPZ1

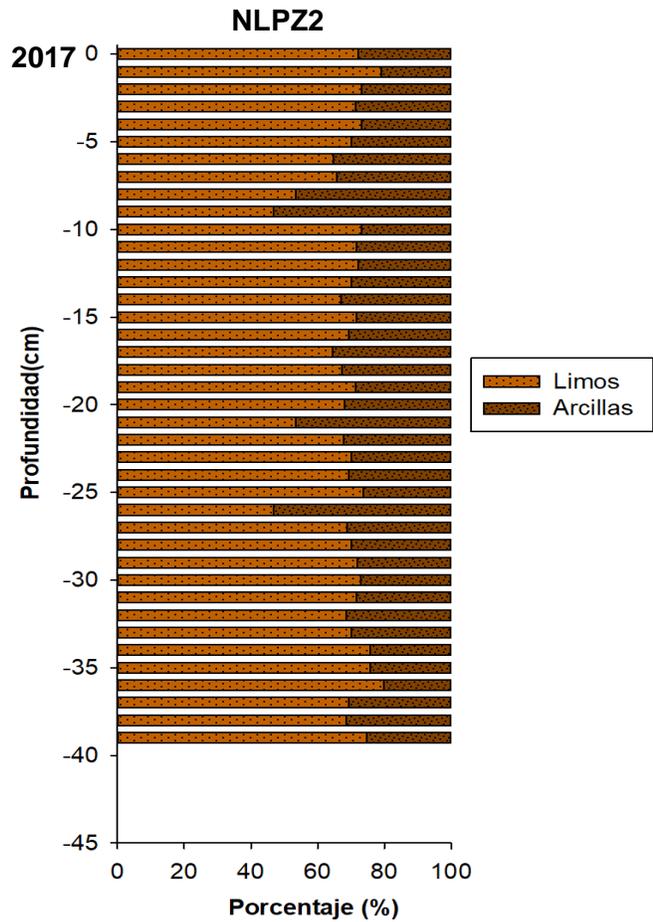
El núcleo NLPZ1 se caracterizó por tamaños de grano finos, de arcillas a limos, siendo dominantes los limos a lo largo de todo el núcleo con excepción de algunos intervalos (Fig. 11). Se observó una tendencia al aumento del contenido de arcillas (porcentual) a partir de los primeros 10 cm de profundidad, mientras que por debajo de los 10 cm los limos prevalecen. (Fig. 11).

**Figura 11.** Perfil vertical del contenido (%) de limos y arcillas del núcleo NLPZ1.



### 8.1.2 NLPZ2

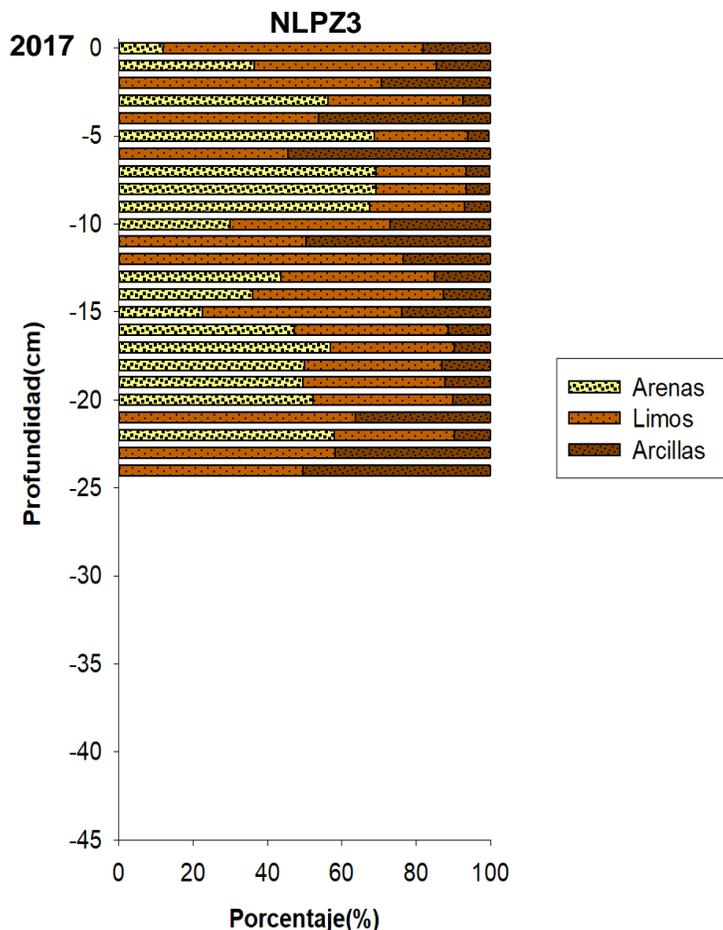
En el núcleo NLPZ2 el tamaño de grano dominante fueron limos y en menor proporción arcillas. Los limos presentaron porcentajes mayores de 60% y las arcillas porcentajes <40%. Sin embargo, a partir del centímetro 10, se observó un incremento continuo en el porcentaje limos hacia la parte superficial del núcleo (Fig. 12).



**Figura 12.** Perfil vertical del contenido (%) de limos y arcillas del núcleo NLPZ2.

### 8.1.3 NLPZ3

En el núcleo NLPZ3 se observaron tres tamaños de grano: arenas muy finas, limos y arcillas. Los limos y arcillas representaron el 100% en algunas secciones del núcleo. Las arenas muy finas alcanzaron porcentajes del 60 % en algunos horizontes del núcleo. En general, no se observó tendencia de tamaño a lo largo del núcleo, con excepción de los primeros 5 cm de la parte superior donde los lodos incrementaron su contenido porcentual (Fig. 13).



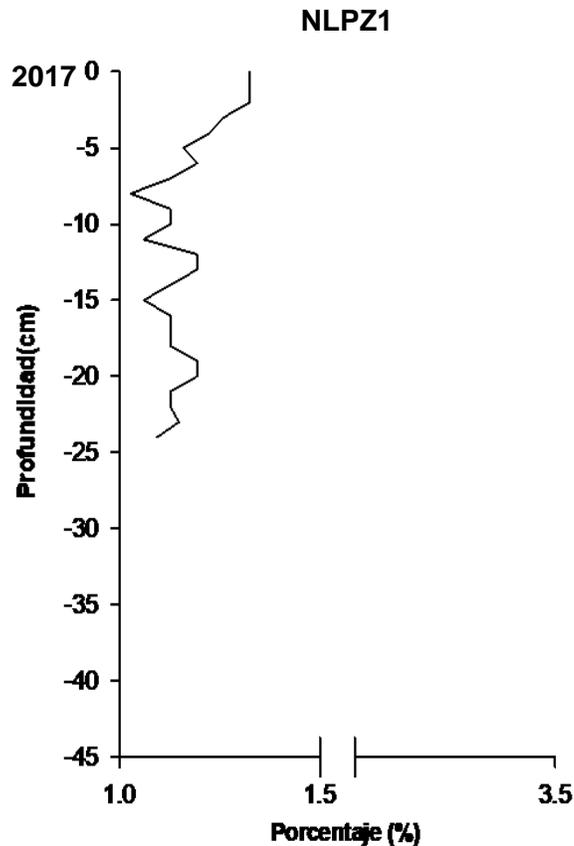
**Figura 13.** Contenido de arenas muy finas, limos y arcillas del núcleo NLPZ3.

## 8.2. Carbono orgánico

El porcentaje de carbono orgánico solo se determinó en los núcleos NLPZ1 y NLPZ2, esto debido a la disponibilidad de muestra.

### 8.2.1 NLPZ1

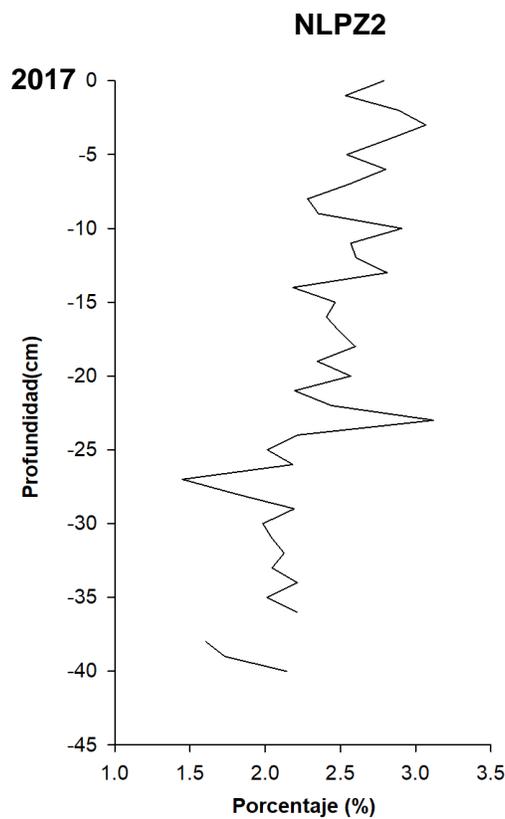
En el núcleo NLPZ1 sólo se analizaron los primeros 25 centímetros. Los valores de carbono orgánico fluctuaron de entre 1 a 1.5%. Los porcentajes cercanos a 1% se encontraron en el intervalo de 25 a 8 cm de profundidad. En el mismo perfil, se observó que el contenido de carbono orgánico se incrementó gradualmente a partir de los 8 cm hacia la superficial del núcleo (Fig.14).



**Figura 14.** Perfil vertical del contenido de carbono orgánico, con respecto a la profundidad del núcleo NLPZ1.

### 8.2.2 NLPZ2

En el núcleo NLPZ2, el contenido de carbono orgánico fue mayor con respecto al núcleo NLPZ1. El carbono orgánico varió de 1.5 a <3.5 %. En el intervalo de 40 a 25 cm, el contenido de carbono orgánico varió entre 1.5 y 2.5%. Mientras que, en el intervalo de 25 a 0 cm, el contenido de carbono orgánico incrementó gradualmente hasta 3.5% hacia la superficie del núcleo (Fig. 15).



**Figura 15.** Perfil vertical del contenido de carbono orgánico con respecto a la profundidad del núcleo NLPZ1.

### 8.3. Identificación de foraminíferos

En los 3 núcleos colectados en la laguna de La Paz se cuantificaron un total de 6945 individuos; de los cuales se identificaron 8 géneros (Tabla. 1): *Ammonia*, *Elphidium*, *Quinqueloculinas*, *Peneroplis*, *Textularia*, *Bolivina*, *Polystomellina* y *Florilus*. Cada núcleo presentó características distintivas en la abundancia y distribución vertical de los géneros de foraminíferos. En general, *Ammonia* y *Elphidium* fueron los géneros de mayor abundancia y distribución vertical en la laguna ya que se encuentran presentes en los 3 núcleos. Se observó una buena preservación de las conchas, no se identificaron conchas con deformaciones, por lo tanto no se presentaron problemas comunes al momento de identificar a los foraminíferos.

**Tabla 1.** Listado taxonómico de los géneros identificados en sedimentos de la Laguna de La Paz.

---

**Reino:** Protistas

**Subreino:** Protozoa

**Superphylum:** Sacordina

**Pylum:** Rhizopoda

**Clase:** Granuloreticulosa

**Orden:** Foraminifera Eichawald, 1835

**Suborden:** Rotaliina Delage y Hérouard, 1896

**Familia:** Ammoniidae Saidova, 1981

**Género:** *Ammonia* Brünnich, 1772

**Familia:** Elphidiidae Galloway, 1933

**Género:** *Elphidium* Cushman y Brönnimann, 1948

**Género:** Polystomellina ? Yabe & Hanzawa, 1923

**Suborden:** Miliolina Delage y Hérouard, 1896

**Familia:** Quinqueloculininae Cushman, 1917

**Género:** *Quinqueloculina* d'Orbigny, 1826

**Familia:** Peneroplidae Schultze,

**Género:** *Peneroplis* de Montfort, 1808

**Orden:** Textulariida

**Suborden:** Textulariina; Kaminski, 2004

**Familia:** Textulariidae

**Género:** *Textularia* d'Orbigny, 1839

**Orden:** Buliminida / Rotaliida

**Suborden:** Buliminida / Rotaliida

**Familia:** Bolivinidae

**Género:** *Bolivina* d'Orbigny, 1839

**Orden:** Rotaliida

**Suborden:** Rotaliina Delage y Hérouard, 18

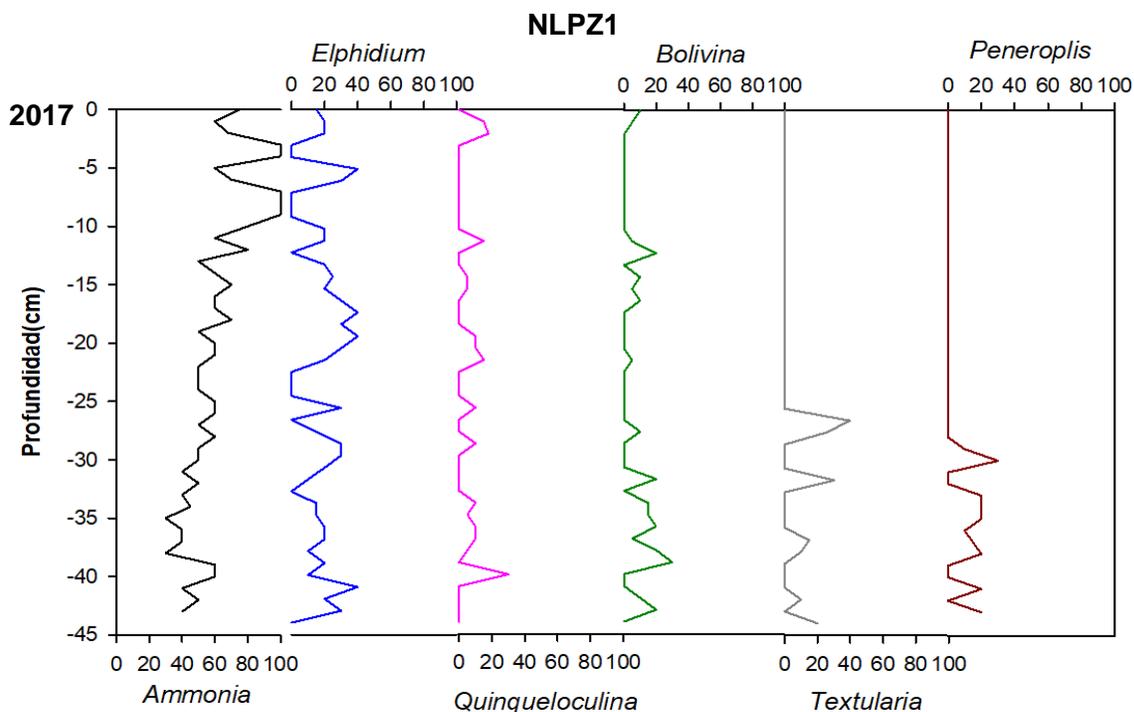
**Familia:** Gavelinellidae

**Género:** *Florilus* de Montfort, 18

---

### 8.3.1 NLPZ1

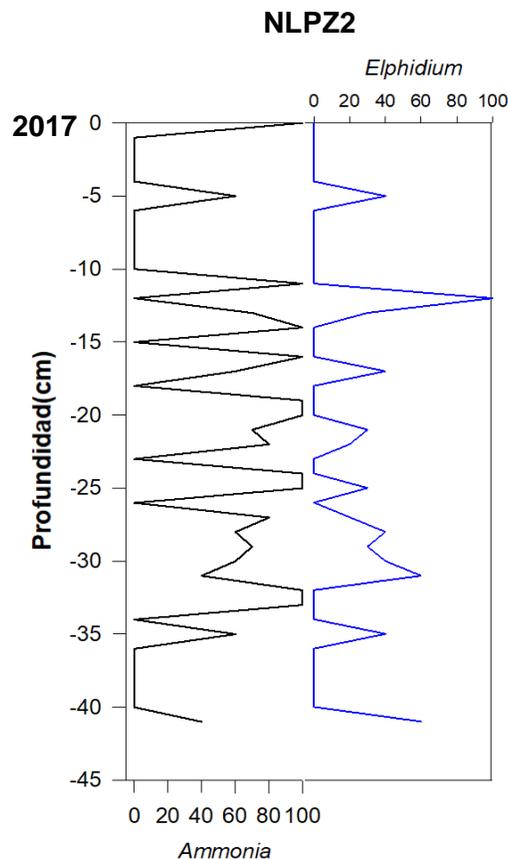
En el núcleo NLPZ1 se contabilizaron 4146 organismos y se identificaron un total de 6 géneros: *Ammonia*, *Elphidium*, *Quinqueloculina*, *Bolivina*, *Textularia*, *Peneroplis* (Tabla.1). *Ammonia* es el género más frecuente, se encuentra presente en todas las muestras del núcleo y a lo largo del núcleo con una tendencia a incrementar su porcentaje hacia la parte superficial del mismo. Los porcentajes más altos de abundancia de éste género, se presentan a partir del centímetro 10. *Elphidium* es el segundo género más abundante, no presenta una tendencia en particular. Sin embargo, son notorios cambios en los porcentajes de *Elphidium* específicamente cuando *Ammonia* aumenta *Elphidium* decrece y viceversa. Los géneros *Quinqueloculina* y *Bolivina* tuvieron presencia casi permanente en el intervalo de 45 a 10 cm y no están presentes en el intervalo de 10 a 2 cm. *Textularia* y *Peneroplis* se observaron en el intervalo de 45 a 25 cm con porcentajes <30%. Los mayores porcentajes de foraminíferos bentónicos están relacionados con el gradiente de sedimentación y con las fracciones finas del sedimento que se localizan en el intervalo de 43 a 25 cm del núcleo NLPZ1 (Fig.16).



**Figura 16.** Porcentaje relativo de los géneros de foraminíferos bentónicos en el núcleo NLPZ1.

### 8.3.2 NLPZ2

El núcleo NLPZ2, fueron registrados un total de 202 de organismos y se identificaron 2 géneros, *Ammonia* el género más abundante incluso en algunas secciones del núcleo llega al 100%, sin embargo, su ocurrencia aumenta hacia la parte basal del núcleo. *Elphidium*, como segundo género presente, tampoco tiene una tendencia, pero en algunos centímetros del núcleo, llega también a porcentajes de 100%, específicamente cuando *Ammonia* no se encuentra presente. De manera general este núcleo se considera con baja presencia de géneros, sustentado en la diferencia de géneros identificados en los núcleos NLPZ1 y NLPZ3 (Fig. 17).

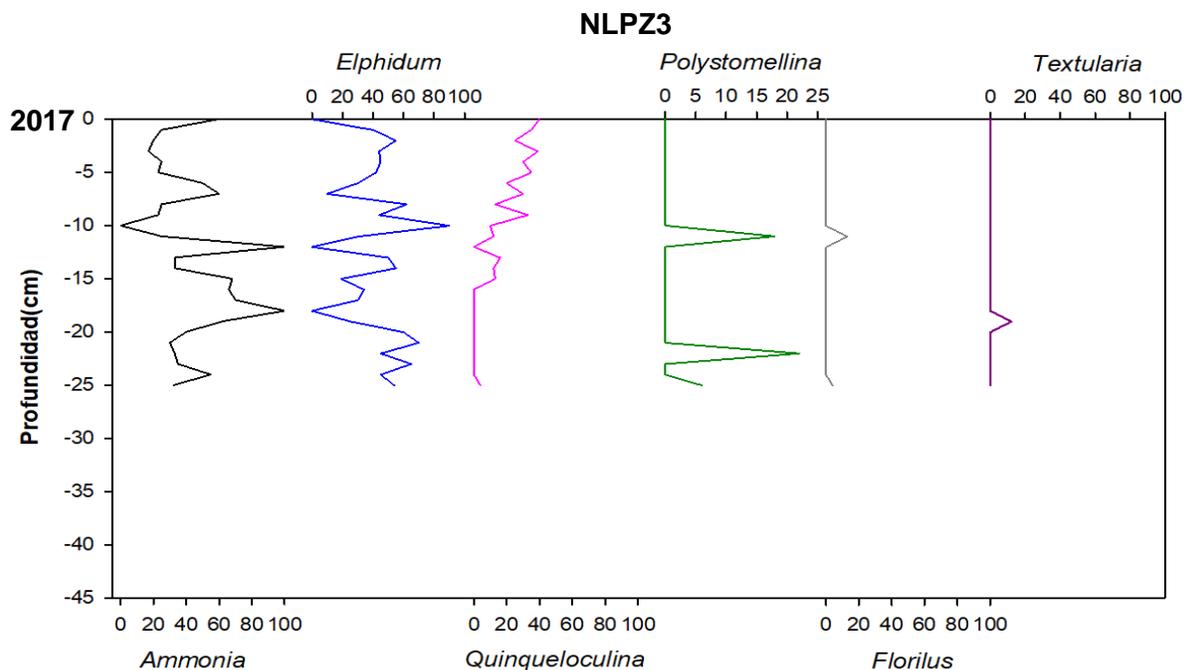


**Figura 17.** Porcentaje relativo de los géneros de foraminíferos bentónicos en el núcleo NLPZ2.

### 8.3.3 NLPZ3

En el núcleo NLPZ3 se contabilizaron un total de 2597 organismos en el cual se identificaron un total de 6 géneros: *Ammonia*, *Elphidium*, *Quinqueloculina*,

*Polystomellina*, *Florilus* y *Textularia*. El género más común fue nuevamente *Ammonia* con un porcentaje <50% y una ligera tendencia a disminuir hacia la parte superficial del núcleo. *Elphidium* fue el segundo género más común con 40% de abundancia, sin ninguna tendencia relativa a alguna condición de concentración de la MO, a lo largo del núcleo. Sin embargo, presentó la misma tendencia que en los núcleos NLPZ1 y NLPZ2, que fue el incremento/decremento en la abundancia de *Elphidium* acompañado por el decremento/aumento de *Ammonia*. El género *Quinqueloculina* presentó una tendencia al enriquecimiento de su porcentaje relativo a partir del intervalo de 15 cm y hacia la parte superficial del núcleo. Los otros 3 géneros *Polystomellina*, *Florilus* y *Textularia*, sólo alcanzaron porcentajes <20% y se encontraron en algunas secciones del núcleo (Fig. 18).



**Figura18.** Porcentaje relativo de los géneros de foraminíferos bentónicos del núcleo NLPZ3.

## 9. Discusión

### 9.1 Distribución vertical de los sedimentos de la laguna de La Paz

El tipo de sustrato y el tamaño de grano de los sedimentos son uno de los parámetros que limitan la distribución y abundancia de los foraminíferos bentónicos en ambientes marinos transicionales. El tipo de sustrato y sedimento está directamente asociado a las condiciones hidrodinámicas del ambiente en el que estos organismos habitan (Sen Gupta, 2002; Murray, 2006).

Los resultados del tamaño de grano sugieren que el margen sur (NLPZ2) y parte profunda (NLPZ1) de la laguna de La Paz dominan las fracciones de limos y arcillas, mientras que en el margen noroeste (NLPZ3) existe una intercalación de arenas muy finas y lodos, que resultan del aporte de arenas muy finas de los arroyos que descarga en el estero Zacatecas o por influencia y transporte eólico de las partículas desde las dunas de El Mogote (Pérez-Tribouillier, 2014).

El núcleo NLPZ2 ubicado en el margen sur del sitio de estudio, donde las condiciones hidrodinámicas de baja energía, con velocidades residuales  $<2 \text{ cm s}^{-1}$  (Gómez *et al.*, 2003) permiten la depositación y acumulación de sedimentos limo-arcillosos (fangosos), esto es corroborado por la dominancia de lodos a lo largo del núcleo. En el estudio de 1976, se describe que el ambiente sedimentario superficial del margen sur de la laguna, se caracterizó por un alto contenido de fangos o lodos (Espinosa-Avalos, 1979). Posteriormente, Green-Ruiz y Larrínaga-Cunningham (1986) reportaron para este mismo margen, sedimentos lodosos con alto contenido de materia orgánica. Tres décadas después, los sedimentos superficiales de este margen siguen estando dominados por limos y arcillas (Pérez-Tribouillier, 2014). Esto sugiere que las condiciones hidrodinámicas y de depositación en el margen de sur de la laguna no han cambiado desde 1976. Además, se puede inferir que la velocidad de las corrientes residuales  $<2 \text{ cm s}^{-1}$  (Gómez -Valdés *et al.*, 2003), no han modificado el tipo de sustrato donde habitan las especies bentónicas.

En la zona profunda de la laguna, los sedimentos del núcleo NLPZ1, al igual que los del núcleo NLPZ2, son lodosos y el contenido de arcillas como se mencionó, muestra una tendencia de incremento hacia la parte superficial del núcleo a partir del

centímetro 9(Fig.11y Fig.12). De hecho, este incremento de arcillas hacia la parte superior sugiere que las condiciones hidrodinámicas continúan siendo de muy baja energía en este sector de la laguna. La distribución espacial de estos sedimentos de acuerdo con los estudios previos (Espinosa-Avalos,1979),(Green-Ruiz y Larrínaga-Cunningham,1986)y(Peréz-Tribouillier,2014) reportan sedimentos fangosos sugiriendo que las condiciones hidrodinámicas en esta región de laguna se mantienen sin cambio con respecto al presente estudio.

Considerando que los resultados de éste estudio sobre la descrita distribución del tamaño de grano en el margen sur y parte central de laguna, el sistema se ha mantenido sin cambio desde 1976, el predominio de sedimentos lodosos a lo largo de los registros sedimentarios colectados en 2017 en estas dos regiones de la laguna sugiere que las condiciones del sustrato se han mantenido estables por varias décadas. Esto es importante desde el punto de vista ecológico, porque uno de los principales factores que evidencia la variabilidad de un sistema; es la fauna bentónica, como los foraminíferos que son indicadores de las condiciones del sustrato donde estos microorganismos habitan (Sen Gupta, 2002; Murray, 2006). Bajo esta premisa podemos considerar que la variabilidad vertical en la abundancia de los foraminíferos en estos dos núcleos, no se debe a cambios en las condiciones del tamaño de grano del sustrato (Sen Gupta, 2002; Murray, 2006) o por un cambio en las condiciones hidrodinámicas del ambiente que pueden ocasionar un transporte selectivo de las conchas de foraminíferos y la preferencial depositación o permanencia de conchas de foraminíferos con condiciones morfológicas que permitan establecerse bajo condiciones hidrodinámicas (Yordanova y Hohenegger, 2007; Kelham, 2011).

La depositación y acumulación de los sedimentos del núcleo NLPZ3, mostró intercalaciones de lodos y arenas muy finas, que sugieren cambios en las condiciones hidrodinámicas dentro de la laguna o por el aporte de sedimentos de fuentes externas como puede ser el arroyo La Ardilla que desemboca en el área de colecta o por arenas muy finas del campo de dunas de El Mogote (Peréz-Tribouillier, 2014). Los estudios previos sobre las características del tamaño de grano indicaron una mezcla de arenas finas a muy finas con arcillas en esta región de la laguna (Espinosa-Avalos, 1979; Green-Ruiz y Larrínaga-Cunningham, 1986). De hecho, los sedimentos superficiales

frente al arroyo de La Ardilla estuvieron caracterizados por arenas finas con alto contenido de lodos (Pérez-Tribouillier, 2014). Esta bimodalidad que caracteriza los sedimentos superficiales del margen noroeste de la laguna se ve reflejada a lo largo del núcleo NLPZ3 con excepción de algunos intervalos donde predominan los lodos. Las evidencias del tamaño de grano, refuerzan la hipótesis sobre las fuentes externas como responsables de la bimodalidad de los sedimentos en esta margen de la laguna, y no, por cambios en las condiciones hidrodinámicas, de hecho, las corrientes residuales en esta zona de la laguna menores de  $3 \text{ cm s}^{-1}$  (Gómez *et al.*, 2003), no explicarían el porcentaje de arenas finas a muy finas depositadas, que requieren velocidades de  $10 \text{ cm s}^{-1}$  para promover su transporte y dispersión (Yordanova y Hohenegger, 2007; Kelham, 2011). De esta forma, la variación en la abundancia de los foraminíferos bentónicos refleja la tanatocenosis y provee una herramienta creíble para investigar el desarrollo de los ambientes marinos transicionales (e.g., Toefy y Gibbons, 2014; Nesbitt *et al.*, 2015; Dijkstra *et al.*, 2017) y en la laguna de La Paz (Gómez-León *et al.*, 2018).

### **9.3 Distribución vertical del contenido de carbono orgánico**

Al igual que el tipo de sustrato, el contenido de materia orgánica en los sedimentos de ambientes marinos transicionales limita la distribución y abundancia de los foraminíferos bentónicos (Sen Gupta, 2002; Murray, 2006). En ambientes con alto contenido de materia orgánica es posible encontrar poca abundancia de foraminíferos bentónicos, de hecho, en estos ambientes es posible identificar, deformación, baja calcificación de las conchas o estadios de inmadurez (Martins *et al.*, 2013, 2016) debido al estrés por deficiencia de oxígeno disuelto tanto en la columna de agua como en el sedimento (Murray, 2006). La distribución vertical del carbono orgánico en sedimentos, varía entre 1% y 3.5% en la laguna de La Paz. Este intervalo concuerda con los valores de carbono orgánico que han sido reportados en las últimas décadas para la laguna de La Paz (Green-Ruiz y Larrínaga-Cunningham, 1986; Pérez-Tribouillier, 2014). En el núcleo NLPZ1, el contenido de carbono orgánico varía entre 1% y 1.5% con un incremento gradual a partir del intervalo de 10 cm. El incremento de carbono orgánico coincide con el aumento observado de lodos, hacia la parte superior de núcleo. Se ha documentado que existe una afinidad hacia un mayor contenido de

carbono orgánico en sedimentos lodosos (Martins *et al.*, 2016). Aunque el contenido de carbono orgánico solo incremento en 0.5% con respecto a la parte basal del núcleo NLPZ1 este cambio puede ser asociado a un aumento de materia orgánica de origen natural o por actividad antropogénica. En la parte profunda de la laguna se ha estimado una tasa de sedimentación de 0.6 cm por año (Pérez-Tribouillier, 2014), bajo la consideración que la tasa de sedimentación se ha mantenido constante a lo largo de las últimas décadas, el incremento de carbono orgánico observado a partir del intervalo 9 cm, corresponde con el año de 2002. En el periodo de 1990 al 2000, la población de La Paz incrementó en 36 mil habitantes, mientras que en el periodo de 2000 a 2015 este incremento fue de 76 mil habitantes (273 mil habitantes en 2015), que es la mayor tasa de crecimiento población en las últimas décadas para la ciudad de La Paz (INEGI, 2017). Esto permite suponer que el incremento de carbono orgánico, está asociado con el crecimiento demográfico que propicia una mayor demanda de bienes y servicios, sin embargo; se requiere trazar la fuente de esta materia orgánica para discriminar entre la actividad antropogénica y las fuentes naturales de materia orgánica a la laguna de La Paz.

En el margen sur de la laguna, el contenido de carbono orgánico en NLPZ2 fue mayor al núcleo NLPZ1 con porcentajes de 1.5 a <3.5%. El contenido de carbono orgánico en la parte basal del núcleo muestra poco cambio y a partir del intervalo de 25 cm muestra una tendencia de incremento gradual hasta <3.5%. (Green-Ruiz y Larrínaga-Cunningham, 1986) reportaron un bajo contenido de carbono orgánico de 1% para el margen sur de la laguna, lo que concuerda con el porcentaje relativo de carbono orgánico en la sección basal del núcleo NLPZ2. Hacia la parte superficial del núcleo, el contenido de carbono orgánico varía entre 2.5 y 3.0%, siendo muy similar a lo reportado por (Pérez-Tribouillier, 2014), esto indica que el carbono orgánico aumento en 2% en ~30 años en el margen sur de la laguna. Si se considera que el contenido de carbono orgánico de 1% en la parte basal del núcleo NLPZ2 corresponde con el contenido de 1986 (Green-Ruiz y Larrínaga-Cunningham, 1986), el incremento constante de carbono orgánico correspondería con el aumento de las actividades antropogénicas alrededor de la laguna de La Paz, sin embargo, es necesario realizar el fechado radiométrico para precisar la edad en este núcleo de sedimento.

#### 9.4 Distribución vertical de los foraminíferos bentónicos

La distribución vertical de los foraminíferos está compuesta de 8 géneros: *Ammonia*, *Elphidium*, *Quinqueloculina*, *Polystomellina*, *Florilus*, *Textularia*, *Bolivina*, *Peneroplis*. Los porcentajes de los foraminíferos bentónicos fue muy variable entre sitios de colecta, se ha sugerido que, en ambientes marinos transicionales que están siendo afectados por actividades antropogénicas puede conducir a la dominancia de dos o tres géneros (Martins *et al.*, 2016). En el caso de la laguna de La Paz, los géneros *Ammonia* y *Elphidium* son dominantes en los tres sitios de colecta, ambos son considerados tolerantes al estrés principalmente por materia orgánica (Murray, 1991; Carnahan *et al.*, 2009) y son capaces de tolerar bajas condiciones de oxígeno (Jorissen *et al.*, 1995). Otros géneros como *Quinqueloculina* y *Peneroplis*, son consideradas especies epifaunales, tolerantes a zonas oxigenadas (Murray, 2001; Murray, 2006; Alves - Martins *et al.*, 2013; Dimiza *et al.*, 2016).

En el núcleo NLPZ1, *Ammonia* y *Elphidium*, con porcentajes mayores al 50% del porcentaje relativo. *Ammonia* presentó incremento en su abundancia a partir del intervalo de 35 cm. Mientras que *Elphidium*, *Quinqueloculina* y *Bolivina* no presentaron alguna tendencia a lo largo del núcleo, estos géneros aumentan o disminuyen su abundancia con respecto a *Ammonia*. Los géneros *Peneroplis* y *Textularia*, solo se identificaron en el intervalo de 25 a 45 cm de profundidad del núcleo. En comparación con el núcleo NLPZ2 y NLPZ3, los cuales muestran a *Ammonia* y *Elphidium* como los géneros dominantes, en el caso de NLPZ3 se tiene la presencia de otros géneros con poca importancia relativa, excepto para *Quinqueloculina* con un incremento constante, a partir del intervalo 15 cm hasta un máximo de 40% hacia la superficie de este núcleo. En otros sistemas lagunares, se ha encontrado que el número de géneros es mucho mayor (>15, e.g., Martins *et al.*, 2015, 2016) al número de géneros en este estudio, sin embargo, el bajo número de géneros concuerda con otros sistemas lagunares como los reportados por (Dijkstra *et al.*, 2017; Orabi *et al.*, 2017; Baz, 2018;). El bajo número de géneros en un ambiente marino transicional puede ser el reflejo de la selección preferencial morfológica de los foraminíferos bentónicos que pueden ser removidos y transportados por corrientes marinas hacia otros sitios dentro del área de estudio (Sen Gupta, 2002; Murray, 2006). En la laguna de La Paz, las corrientes con velocidades

15 y 100  $\text{cms}^{-1}$  (Salinas-González, 2000) no son lo suficientemente intensas para ocasionar que las conchas de los foraminíferos, sean seleccionadas, cuando la velocidad de las corrientes aumenta por fenómenos extraordinarios (Húrcanes) debido a que la preservación de la concha es buena y no se observan rupturas, se deduce que no existe un transporte de foraminíferos como tal, por lo que podemos considerar que los foraminíferos bentónicos en los núcleos de sedimento son un reflejo de la tanatocenosis en cada sitio de colecta, lo cual es corroborado por el tamaño de grano que caracteriza cada uno de los sitios. Los porcentajes relativos de *Ammonia* a lo largo de los registros sedimentarios de la laguna, sugiere que las condiciones del sedimento han venido experimentado un deterioro en la zona profunda del sistema (NLPZ1) (Fig.19), mientras que en el margen sur de la laguna (NLPZ2)(Fig.19) existe, adicionalmente, la ausencia de foraminíferos bentónicos, ha permanecido con baja calidad sedimentaria. En el margen noroeste (NLPZ3), la variabilidad de *Ammonia* indica que esta zona se mantiene en condiciones de pobre a moderada calidad del ambiente sedimentario a lo largo del registro. *Ammonia* es un foraminífero que ha sido utilizado como trazador de las condiciones ambientales en cuerpos lagunares (Carnahan *et al.*, 2009; Martins *et al.*, 2015, 2016; Baz *et al.*, 2018; Gómez-León *et al.*, 2018; Charrieau *et al.*, 2018). La dominancia de *Ammonia* ha sido asociada a la presencia de elementos potencialmente tóxicos (e.g., Martins *et al.*, 2015, 2016; Baz *et al.*, 2018) o altos contenidos de materia orgánica (Carnahan *et al.*, 2009; Gómez-León *et al.*, 2018; Charrieau *et al.*, 2018) en estos ambientes.

En el caso de la laguna de La Paz, los estudios realizados sobre elementos potencialmente tóxicos en sedimentos superficiales reportan que elementos como As, Cd, Pb y Zn han mostrado un decremento de su concentración a partir de 1996 y hasta 2013; con excepción del Cu que registro un incremento con un factor de enriquecimiento de 2; en este mismo periodo (Pérez-Tribouillier *et al.*, 2015). Por lo tanto, el cambio en el nivel de contaminación por elementos traza de influencia antropogénica entre 1996 y 2013 es bajo (Méndez *et al.*, 1998; Shumilin *et al.*, 2001; Pérez-Tribouillier *et al.*, 2015) y sin efectos significativos en la microfauna bentónica. La relación de *Ammonia* con el incremento observado de carbono orgánico en los núcleos de sedimento será discutido en la siguiente sección.

El segundo género dominante es *Elphidium* que muestra una relación con la abundancia relativa de *Ammonia* para los tres sitios de colecta. *Elphidium* es un género que frecuentemente está asociado a *Ammonia* en ambientes marinos transicionales donde los niveles de calidad del ambiente sedimentario; son pobres o regulares (Carnahan *et al.*, 2009; Martins *et al.*, 2015, 2016; Baz *et al.*, 2018; Gómez-León *et al.*, 2018; Charrieau *et al.*, 2018). De hecho, el índice *Ammonia-Elphidium* es utilizado para definir el estado de oxigenación de los sedimentos en ambientes costeros (Sen Gupta y Platon, 2006). De tal forma que la abundancia de estos dos géneros, es indicativa de cómo las condiciones de oxigenación han cambiado en los sitios de colecta de los núcleos, cuando los porcentajes relativos de *Ammonia* es del 100%, como en algunos intervalos de los tres núcleos, indica una tendencia hacia condiciones de hipoxia (Sen Gupta y Platon, 2006). El incremento paulatino en la abundancia de *Ammonia* hacia la parte superficial del núcleo NLPZ1 y sin tendencia de *Elphidium* sugiere que las condiciones de hipoxia se han venido estableciendo en la parte profunda de la laguna. En el margen sur de la laguna, el índice *Ammonia-Elphidium* indica condiciones de hipoxia permanente, lo cual es evidenciado por la completa ausencia de ambos géneros en algunos intervalos del NLPZ2. De hecho, la asociación *Ammonia* y *Elphidium* se documenta como dominante en sitios donde ocurren descargas de tipo industrial, doméstico y agrícola; por ejemplo, en la zona costera de Egipto (Badawi y Waffa, 2016).

En el núcleo NLPZ3, el índice *Ammonia-Elphidium* solo en pocos intervalos las condiciones de oxigenación en el sedimento fueron muy cercanas a la hipoxia, de manera general, este sitio puede considerado como sedimentos bien oxigenados. De hecho, el incremento en la abundancia relativa de *Quinqueloculina* hacia la superficie del núcleo NLPZ3 es indicativo de condiciones buenas en la calidad del ambiente sedimentario (Carnahan *et al.*, 2009; Dimiza *et al.*, 2016).

En la parte basal del núcleo NLPZ1, intervalo de 45 a 25 cm, tenemos presencia de géneros *Textularia* y *Peneroplis* que son considerados no tolerantes al estrés ambiental (Sudara *et al.*, 2016). La presencia de estos géneros indica un cambio de condiciones ambientales y un decremento en el flujo de materia orgánica. Aunque estos géneros no se encuentran comúnmente presentes en zonas con sedimentos

lodosos (Sudara *et al.*, 2016), su presencia en el núcleo NLPZ1 caracterizado por sedimentos lodosos, es indicativo de condiciones regulares a buenas en el ambiente sedimentario, lo cual es corroborado por un bajo índice Ammonia-Elphidium, menor abundancia relativa de *Ammonia* en el intervalo de 45 a 25 cm y la presencia de géneros indicadores de condiciones saludables del ambiente sedimentario.

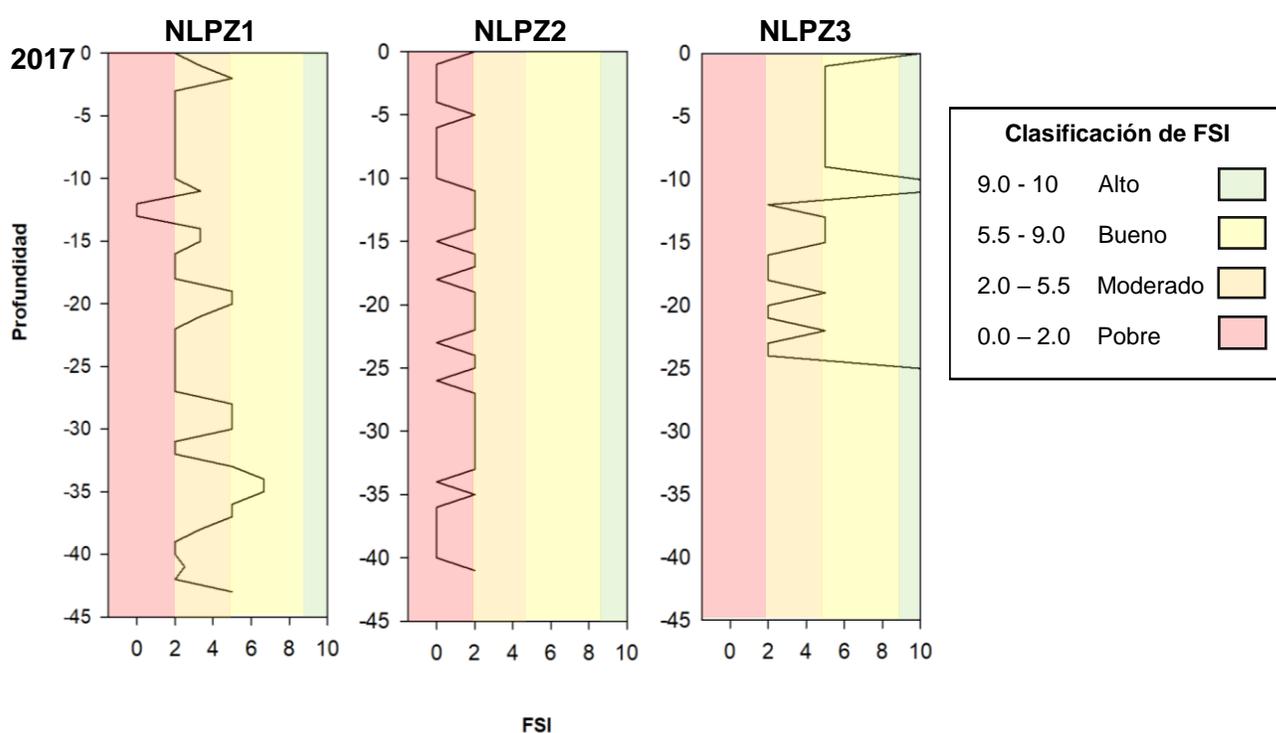
Finalmente, el análisis faunístico, muestra la ausencia o el reducido número de géneros en los tres registros sedimentarios de la laguna de La Paz, indicando que la calidad del ambiente es poco favorable para algunos géneros de foraminíferos bentónicos. Por ejemplo, el número de organismos de 202 en el núcleo NPLZ2, es contrastante con los núcleos NPLZ1 con 4146 y NPLZ3 con 2597 organismos. Esto enfatiza que existe un gradiente en la calidad del ambiente sedimentario, desde el margen sur a la región central y margen noroeste de la laguna, inicialmente descrito para sedimentos superficiales de la laguna (Gómez-León *et al.*, 2018) de La Paz. Resultados similares fueron descritos para la costa de Israel, donde se demostró que la abundancia de foraminíferos bentónicos se vio reducida en 50% entre el periodo de 2003 a 2012; producto de las descargas de aguas residuales que incrementaron la concentración de materia orgánica (Roni *et al.*, 2017) en el sistema.

### **9.5 Índice de estrés de foraminíferos**

Los géneros de foraminíferos bentónicos son susceptibles a cambios en la calidad del ambiente sedimentario. Existen algunos géneros que son tolerantes a los agentes externos que modifican el ambiente sedimentario, ocasionando que los géneros no tolerantes a estrés ambiental, por contaminantes inorgánicos u orgánicos, reduzcan su presencia o estén ausentes en la localidad de estudio (Dimiza *et al.*, 2016). El índice de estrés de foraminíferos, es una herramienta que permite establecer el estado de calidad del ambiente sedimentario en función de la proporción de géneros de foraminíferos bentónicos tolerantes y no tolerantes a estrés; por efectos del contenido de materia orgánica y concentraciones de elementos potencialmente tóxicos (Dimiza *et al.*, 2016).

La calidad del ambiente sedimentario, de acuerdo al índice de estrés de foraminíferos, indica que en el núcleo NLPZ1 se ha mantenido entre buena a moderada, con una tendencia hacia la parte superficial del núcleo a condiciones de

moderada calidad del ambiente sedimentario (Fig. 19). En el núcleo NLPZ2, la calidad del ambiente sedimentario es pobre a lo largo de todo el registro sedimentario (Fig. 19), lo cual se sustenta por la ausencia de géneros, interpretado como un microambiente sedimentario azoico, donde las condiciones ambientales no soportan la presencia de organismos bentónicos (Dimiza *et al.*, 2016). Por lo tanto, el margen sur de la laguna es representa un ambiente sedimentario de muy baja calidad. Las condiciones en el margen noroeste de laguna varían de moderada a buena calidad del ambiente sedimentario (Fig.19)



**Figura 19.** Índice de estrés de foraminíferos (FSI por sus siglas en inglés) aplicado a los núcleos de la laguna de La Paz. Las barras de color corresponden con la escala de valores del índice (Dimiza *et al.*, 2016).

## 10. Conclusiones

- La distribución vertical del tamaño de grano está caracterizada por lodos en el margen sur y parte central, y por lodos arenosos en el margen noroeste de la laguna de La Paz. La distribución vertical de la abundancia de los foraminíferos no es controlada por el tamaño de grano, debido a la homogeneidad de los lodos en los núcleos de sedimento, de lo cual se infiere que las condiciones hidrodinámicas no son tan intensas para redistribuir los foraminíferos bentónicos. Por lo tanto, los porcentajes relativos de los foraminíferos bentónicos refleja la tanatocenosis y provee una herramienta para investigar la calidad del ambiente sedimentario.
- El contenido de carbono orgánico incrementa hacia la parte superficial de los núcleos NLPZ1 y NPLZ2 coincidiendo con el mayor incremento en la abundancia de *Ammonia* en NLPZ1 y la dominancia de *Ammonia* en NPLZ2. El índice *Ammonia-Elphidium* indica que las condiciones de hipoxia sedimentaria están presentes en el sur y la parte central de la laguna coincidiendo con el incremento del porcentaje relativo de *Ammonia* y de carbono orgánico.
- El número de géneros de foraminíferos bentónicos entre los sitios de colecta de los núcleos, es menor en el margen sur con respecto a la parte profunda y margen noroeste de la laguna. Sin embargo, la mayor abundancia de *Ammonia* indica que la calidad del ambiente sedimentario se ha deteriorado en la laguna, lo cual es soportado por el índice de estrés de foraminíferos que indica pobre calidad del ambiente sedimentario en el margen sur, moderada en la parte central y moderada a buena en el margen nororiental de la laguna de La Paz.

## 11. Referencias

- Alves -Martin,M,V., Mohamed – Amine, H , Noureddine, Z., Boukef-BenOmrane,I Frontalini,F., Reis,D.,Portela,H.,Martins,I., Moreira Clemente, M., Nogueira,L., Pereira E., Miranda,P , El Bour,M., Aleya,L., 2013. Organic matter quantity and quality, metals availability and foraminiferal assemblages as environmental proxy applied to the Bizerte Lagoon (Tunisia). *Marine Pollution. Bulletin*,105: 161- 179.
- Alves-Martins,M.V., Silva,F., Lázaro L. M. Laut, Frontalini,F, Clemente-M.M.M, L., Miranda,P.,Figueira,R., Sousa,S. y Alveirinho Dias,J.M.,2015. Response of Benthic Foraminifera to Organic Matter Quantity and Quality and Bioavailable Concentrations of Metals inAveiro Lagoon (Portugal). *Plos one*, 10: 1-23.
- Alyazichi,Y.M.,Jones, B.G. y McLean, E. 2014. Spatial and temporal distribution and pollution assessment of trace metals in marine sediments in Oyster Bay, NSW, Australia. *Journal of Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*,94:52-57.
- Badawi, A., y Wafaa., E., 2015. Tolerance of benthic foraminifera to anthropogenic stressors from three sites of the Egyptian coasts. *Egyptian Journal of Aquatic Research*, 42: 49–56.
- Barker, R., 1960. Taxonomic notes on the species figured by H.B. Brandy in his report on the foraminifera dredged by H.M.S. challenger during the years 1873-1876. Special Publication. Society of Economy Paleontology and Mineralogy, 238 pp.
- Charrieau, L., Filipsson, H., Ljung, K., Chierici,M., Luise Knudsen, K., Kritzberg,E.,2018. The effects of multiple stressors on the distribution of coastal benthic foraminifera: A case study from the Skagerrak-Baltic Sea región. *Marine Micropaleontology*,139: 42–56.
- Carnahan, E,A., Hoare, A,M., Hallock, P., Lidz, B.H., Reich, C.D., 2009. Foraminiferalassemblages in Biscayne Bay, Florida, USA: responses to urban and agricultural influence in a subtropical estuary. *Marine Pollution. Bulletin*, 59:221–233.
- Cervantes-Duarte R., Aguirre-Bahena F., Reyes-Salinas A., Valdez-Holguín J.E., 2001. Caracterización hidrológica de una laguna costera de Baja California Sur, México. *Oceánides*,15:93-105.
- Cruz-Falcón A., 2007.Caracterización y Diagnóstico del Acuífero de La Paz B.C.S. Mediante Estudios Geofísicos y Geohidrológicos. Tesis de Doctorado. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, 139 pp.
- Cuesta-Castillo, L. B., Machain-Castillo, M. L., Monreal-Gómez, M. A., y Gio-Argáez, F. R., 2005. Los foraminíferos planctónicos de la Bahía de La Paz: Su abundancia y distribución en relación a la dinámica oceánica. *Revista de la Sociedad Mexicana de Historia Natural*, 2: 65-77.

- Donnici, S., Serandrei, R., Bonardi, M. y Sperle, M., 2012. Benthic foraminifera as proxies of pollution: The case of Guanabara Bay (Brazil). *Marine Pollution Bulletin. Marine*, 64: 2015-2028.
- Dijkstra, N., Junntila, J., Skirbekk, K., Carroll, J., Husum, K., Hald, M., 2017. Benthic foraminifera as bio-indicators of chemical and physical stressors in Hammerfest harbor (Northern Norway). *Mar. Pollut. Bull*, 114:384–396.
- Dimiza, M., Triantaphyllou, M., Koukousioura, O., Hallock, P., Simboura, N., Karageorgis, A.P., Papathanasiou, E., 2016. The Foram stress index: a new tool for environmental assessment of soft-bottom environments using benthic foraminifera. A case study from the Saronikos Gulf, Greece, Eastern Mediterranean. *Ecol. Indic*, 60:611–621.
- Diz, P. y Francés, G., 2008. Distribution of live benthic foraminifera in the Ría de Vigo (NW Spain). *Marine Micropaleontology*, 66:165-191.
- Espinoza-Avalos, J., 1979. Resultados preliminares sobre la distribución superficial de parámetros físico-químicos en la Ensenada de La Paz, Baja California Sur, durante la primavera de 1976. *CALCOFI Rep.*, 20:150-161.
- Fajemila, O y R Langer, M., 2015. Structure, diversity and environmental role of foraminiferal assemblages from reefal settings of Moorea ( Society Island, French Polynesia). *Geophysical Research*, 17:EGU2015-13316, 2015.
- Fatela, F. y Taborda, R., 2002. Confidence limits of species proportion in microfossil assemblage. *Marine Micropaleontology*, 45:169-174.
- Gilmartin, M. y Revelante, N., 1978. The phytoplankton characteristics of the barrier island lagoon at the Gulf of California. *Est. Coast. Mar. Sci*, 7: 29-47.
- Gómez-León, A., Rodríguez-Figueroa, G., Shumilin, E., Carreño, A.L., Sánchez, A., 2018. Abundance and distribution of benthic foraminifera as indicators of the quality of the sedimentary environment in a subtropical lagoon, Gulf of California. *Mar. Pollut. Bull*, 130: 31-39.
- Gómez Valdés, J., Delgado Contreras, J. A., y Dworak Robinson, J. A., 2003. Overtides, compound tides, and tidal-residual current in Ensenada de la Paz lagoon, Baja California Sur, México. *Geofísica Internacional*, 42: 623-634.
- González-Regalado, M.L., Ruiz, F., Abad, M., Hammoumi, N., Boumaggard, E.H., Bouamterhane, I., Gueddari, F., Toumi, A., Dassy, A. y Ben-Ahmed, R., 2005. Distribution of benthic foraminifera in semi-arid climates: Nador (Morocco) and El Meleh (Tunisia) lagoons. *Geogaceta*, 37: 211-214.
- Granados-Guzmán, A. S y Álvarez- Borrego, S., 1983. Temperature variability in Ensenada de La Paz, B.C.S. *Ciencias Marinas*, 9:133-141.

- Green-Ruiz, C.R. y Larrínaga-Cunningham, H., 1986. Sedimentología y geoquímica de la laguna de La Paz., B.C.S., México. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Baja California Sur, La Paz, B.C.S., México, 83 pp.
- Haq, B.U., y Boersma, A., 1978. Foraminifera. In: Introduction to Marine Micropaleontology. Elsevier, Londres, 376 pp.
- Herguera, J. C., Bernal-Franco, G. y Molina-Cruz, A., 2003. Decadal surface ocean variability in the lower Gulf of California: Records for the past 300 years. *Geofísica Internacional*, 42: 397-406.
- INEGI., 2015. Censo Nacional de Población y Vivienda 2010 en [www.inegi.org.mx](http://www.inegi.org.mx) (fecha de consulta, 4 abril de 2018).
- Jayaraju., N., Sundara Raja Reddy, B.C., Reddy, K. R., 2010. Anthropogenic impact on Andaman coast monitoring with benthic foraminifera, Andaman Sea, India. *Environmental Earth Sciences*, 62: 821-829.
- Jiménez-Illescas, Á.R., 1983. Aplicación de un modelo numérico en la Ensenada de La Paz, B.C.S. Tesis de Maestría. Centro de Investigaciones Científicas de Educación Superior de Ensenada, México., 109 pp.
- Jones, W. R., 2013. Foraminifera and the applications. Cambridge University Press, 392 pp.
- Jorissen, F.J., De Stigter, H.C., y Widmarck, J.G.V., 1995. A conceptual model explaining benthic foraminiferal microhabitats. *Marine Micropaleontology*, 26:3-15.
- Kelham, A., 2011. Investigation into the Post-Mortem Transport of Benthic Foraminifera. Doctoral Dissertation. University of Hull.
- Mackensen, A., 1994: Age models, isotopes, and calcium carbonate of two sediment cores from the Southern Ocean, *PANGAEA*. 728863:105-144.
- Morales, G.E. y Cabrera-Muro, H., 1982. Aplicación de un modelo numérico unidimensional a la Ensenada de La Paz, B.C.S. *Ciencias Marinas*, 8: 69-89.
- Muñoz Casillas, S. I., 2014. Factibilidad física para ganar terreno al mar para uso residencial turístico, en la ensenada de La Paz, B.C.S., México. Tesis de maestría. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, 154 pp.
- Murray, J. W., 1991. Ecology and distributions of benthic foraminifera. Taylor and Francis Ed. 408 pp.
- Murray, J. W., 2001. The niche of benthic foraminifera, critical thresholds and proxies. *Marine Micropaleontology*, 41:1-7.
- Murray, J. W., 2006. Ecology and application of benthic foraminifera. Cambridge University Press, 426 pp.

- Obeso-Nieblas, M., Jiménez-Illescas A.R., y Troyo, D.S., 1993. Modelación de la Marea en la Ensenada de la Paz, B.C.S. *Investigaciones Marinas CICIMAR*, 8:1-11.
- Orabi, O.H., El-Badry, A.A., Badr-ElDin, A.M., 2017. Benthic foraminifera for heavy metal pollution monitoring: A case study from Burullus Lagoon of Egypt. *Marine Pollution Bulletin*, 121:411–417.
- Pérez –Tribouillier, H.U., 2014., Niveles actuales e historia de acumulación de elementos de origen natural y antropogénico en los sedimentos de la laguna de la paz, baja california sur, México. Tesis de maestría. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, 117 pp.
- Pettit, L.R., Hart, M.B., Medina-Sánchez, A.N., Smart, C.W., Rodolfo-Metalpa, R., Hall-Spencer, J.M. y Prol-Ledesma, R.M., 2013. Benthic foraminifera show some resilience to ocean acidification in the northern Gulf of California, Mexico. *Marine Pollution Bulletin*, 47:452–462.
- Phleger, F.B., 1960. Ecology and Distribution of Recent Foraminifera. The Johns Hopkins University Press, 297pp.
- Phleger, F.B., 1963. Oceanografía Física y ecológica de los foraminíferos bentónicos del Golfo de California. *Boletín de la sociedad Geológica Mexicana*, 26:75-83.
- Phleger, F.B., 1964. Patterns of living benthonic foraminifera, Golf of California. *Marine Geology of the Golf of California*, A Symposium, Memoir, 3:377-379.
- Robles-Gil-Mester, S., 1998. El clima en la ciudad de La Paz. Tesis de maestría. Universidad Autónoma de México, 233 pp.
- Rodríguez–Meza, G. D., 1999. Metales pesados en sedimentos de la Ensenada de La Paz, B.C.S., México: La Paz, Baja California Sur. Tesis de Maestría. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, Instituto Politécnico Nacional, 163 pp.
- Roni, T., Chaim, B., Almogi-Labin, A y Kaphzan Orit ,H., 2017. Temporal trends in live foraminiferal assemblages near a pollution outfall on the Levant shelf. *Marine Pollution Bulletin*. (2016).
- Ruiz, F., González-Regalado, M.L., Galán, E., González, M.I., Prudencio, M.I., Dias, M.I., Abad. M., Toscano, A., Prenda, J. y Mara-García, E., 2012. Benthic foraminifera as bioindicators of anthropogenic impacts in two North African lagoons: a comparison with ostracod assemblages. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 29:527-533.
- Salinas-González, F., 2000. Mezcla turbulenta y transporte de masa en La Bahía y Ensenada de La Paz, B.C.S.: experimentación y modelación numérica. Tesis de Doctorado. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, 260pp.

- Santa Rosa-del Rio, M.A., Ávila-Serrano, G.E., Téllez-Duarte, M.A., Gonzalez-Yajimovich, O. y 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*, 63: 445-458.
- Schröder, C. J., Scott, D. B y Medioli, F.S., 1987. Can smaller benthic foraminifera be ignored in paleoenvironmental analyses. *Journal of Foraminiferal Research*, 17: 101-105.
- Segura-Vernis, L.R. y Carreño, A.L., 1991. Foraminíferos y ostrácodos de la Laguna de La Paz, Baja California Sur, México. *Investigaciones Marinas CICIMAR*, 6:195-224.
- Sen-Gupta, B.K., 2002. *Modern Foraminifera*. Springer, 371 pp.
- Sen Gupta, B.K. y Platon, E., 2005. Tracking Past Sedimentary Records of Oxygen Depletion in Coastal Waters: Use of the Ammonia-Elphidium Foraminiferal Index. *Journal of Coastal Research*, 3:1351–1355.
- El Baz, S., 2017. Recent Benthic Foraminifera as ecological indicators in Manzala Lagoon, Egypt. *Revue de micropaléontologie*, 2, 13pp.
- Shumilin, E., Páez-Osuna, F., Green-Ruiz, C., Sapozhnikov, D., Rodríguez-Meza, G., Godínez-Orta, L., 2001. Arsenic, antimony, selenium and other trace elements in sediments of the La Paz Lagoon, Peninsula of Baja California, Mexico. *Marine Pollution Bulletin*, 43:174–178.
- Sundara Raja Reddy, B.C., Jayaraju, N., Sreenivasulu, G., Suresh, U., Reddy, A. N., 2016. Heavy metal pollution monitoring with foraminifera in the estuaries of Nellore coast, East coast of India. *Marine Pollution Bulletin*, 113:542–551.
- Uthicke, S. y Nobes, K., 2008. Benthic Foraminifera as ecological indicators for water quality on the Great Barrier Reef. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 78:763 – 773.
- Yordanova, E., Hohenegger, J., 2007. Studies on settling, traction and entrainment of larger benthic foraminiferal tests: Implications for accumulation in shallow marine sediments. *Sedimentology*, 54:1273 – 1306.
- Vargas-Cañas, M.E., 2011. Foraminíferos del Golfo de Urabá y su potencial como paleoindicadores y bioindicadores de cambios ecológicos. Tesis de maestría. Universidad Nacional de Colombia. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, 122 pp.