

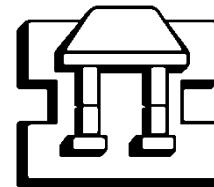


**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES IZTACALA**

---

---



**“METALES PESADOS EN SEDIMENTOS CARBONATADOS  
BIOGÉNICOS DEL SISTEMA ARRECIFAL VERACRUZANO”**

**Tesis que presenta:**

**Abraham Aguilar Franco**

**Para obtener el título de:**

**Biólogo**

**Asesor de Tesis: Dr. Guillermo Javier Horta Puga**

**Estado de México Marzo, 2012**

## AGRADECIMIENTOS

Esta tesis representa un parteaguas entre una etapa muy enriquecedora y el camino que el tiempo obliga. En toda la experiencia universitaria y la conclusión del trabajo de tesis, ha habido personas que merecen las gracias porque sin su valiosa aportación no hubiera sido posible este trabajo y también hay quienes las merecen por haber plasmado su huella en mi camino.

Agradezco a mis padres, Alicia y Enrique, por su apoyo, su guía y su confianza en la realización de mis sueños. Soy afortunado por contar siempre con su apoyo, amor, comprensión y ejemplo. Gracias a ustedes puedo decir que intento ser una mejor persona día a día, son mi inspiración. ¡Los quiero mucho!

A mis hermanas, porque son parte clave en mi vida y crecimiento. Siempre me apoyaron (algunas veces con su dinero je) en todo momento.

Gracias a mi querida nena (Gaby), por ser parte fundamental para que yo realizara una licenciatura, siempre estuviste a mi lado desde el inicio hasta el final de la carrera que concluye con esta tesis. Gracias por tu amor, cariño y apoyo. En verdad siempre te estaré agradecido por cada momento que compartiste conmigo.

Gracias también a mis queridos compañeros del grupo 2, que me apoyaron y me permitieron entrar en su vida durante todos estos años de convivir dentro y fuera del salón

de clase. No omito a ninguno, pero en especial a esas grandes mujeres que siempre me acogieron en el salón, Lau, Chayito y Rebeca.

A mis queridas Ada y Sandra, por ser unas amigas increíbles y con quienes he compartido muchos momentos que siempre llevare en mi corazón. Ustedes enriquecieron mi vida con su cariño, alegría y me enseñaron a ser mejor.

A todos los miembros de la bodeguita por apoyarme en todo momento con la realización de este trabajo. Adri y maestra Margarita, gracias por su ayuda y por hacer mucho más amenas las horas de trabajo en el laboratorio. A mis hermanas académicas JunJun y Yoli por ser unas grandiosas amigas y por convertirse en piezas clave en la etapa final de la carrera, que aunque siempre nos estábamos molestando el apoyo y cariño que llegamos a formar entre nosotros es incondicional.

Agradezco a todos y cada uno de mis amigos que han sido de gran importancia en la trayectoria de mi vida y por ende han sido parte de formar lo que hoy en día soy. En especial a Juka, Gordolobo y Krimen, porque siempre en todo momento sé que puedo contar con ustedes, gracias hermanos.

A mis profesores, que compartieron conmigo sus conocimientos y su amor por la Biología. Gracias a mi Director de Tesis Guillermo Horta Puga por guiarme en todo momento para concluir este trabajo.

**Gracias a todos**

## INDICE

<b>RESUMEN</b>	<b>5</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>6</b>
<b>OBJETIVO GENERAL</b>	<b>14</b>
<b>OBJETIVOS ESPECIFICOS</b>	<b>14</b>
<b>MATERIALES Y MÉTODOS</b>	<b>15</b>
<b>RESULTADOS</b>	<b>23</b>
<b>DISCUSIÓN</b>	<b>32</b>
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>38</b>
<b>LITERATURA CITADA</b>	<b>39</b>

## RESUMEN

Los arrecifes de coral son uno de los ecosistemas marinos más hermosos y complejos de la Tierra que durante los últimos años se han visto afectados por una intensa influencia de las actividades humanas. El Sistema Arrecifal Veracruzano (SAV) es uno de los puertos más importantes y grandes de México, en las últimas décadas las intensas actividades antropogénicas ha contribuido a elevar los niveles de metales pesados (MP) y muchos de estos son acumulados principalmente en los sedimentos. En el presente trabajo se determinaron los niveles de MP para conocer el grado de contaminación que existe en el SAV por estos metales. Las pruebas indican que los niveles de Pb son altos de acuerdo a lo reportado en otros lugares del mundo, sin embargo, los niveles encontrados se concentran en la fracción asociada a  $\text{CaCO}_3$  y estos no llegan a ser una amenaza para los organismos en contraste con la fracción intercambiable o biodisponible en donde los niveles fueron bajos, en donde esta fracción es considerada tóxica para la biota del ecosistema.

## 1.- INTRODUCCIÓN

Los elementos traza son elementos cuya concentración natural generalmente se mide en el orden de partes por millón (ppm) en los diferentes compartimientos ambientales que componen la corteza terrestre: rocas, suelos, sedimentos, agua y aire (Nriagu y Pacyna 1988, Adriano 2001), y casi todos los elementos del grupo de transición de la tabla periódica de los elementos (Cd, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, Pb, etc.) pertenecen a este grupo. Los elementos traza son importantes para el desarrollo de la vida en nuestro planeta, ya que se constituyen como micronutrientes que son esenciales para la síntesis de proteínas y enzimas, por ejemplo metales como el Cu y Fe son de suma importancia en plantas para llevar a cabo la fotosíntesis y respiración mitocondrial (Hänsch y Mendel 2009). Algunos elementos como el Cd, Cr y Pb, no tienen una función conocida en los seres vivos, por lo cual se les denomina elementos no esenciales, incluso en muy bajas concentraciones pueden llegar a ser tóxicos (Viarengo 1985, Goyer 1997).

La contaminación ambiental, especialmente por sustancias químicas es uno de los factores más importantes en la destrucción de los ecosistemas. Durante las últimas décadas los metales traza se han convertido en un agente contaminante muy importante, además de ser ampliamente considerados algunos de ellos como un peligro potencial al ambiente (Mandelli 1979). El desarrollo agropecuario, urbano e industrial a gran escala, sobre todo en los últimos 200 años, ha sido responsable de un incremento inusual en la concentración

---

---

de los elementos traza en el ambiente, sobrepasando en algunos casos ampliamente los niveles base (niveles naturales), por lo cual se han constituido en contaminantes químicos, dentro de los cuales destacan los llamados metales pesados (MP) cuyos efectos se presentan a diferentes escalas, desde alteraciones metabólicas en los organismos, hasta cambios en el paisaje (Bryan y Langston 1992, Horta-Puga 2007). Se pueden citar como ejemplos de casos agudos de intoxicación por MP en poblaciones humanas, los de la Bahía de Minamata en Japón, con presencia de niveles altos de mercurio derivados de los desechos de una planta de producción de fertilizantes (Irukayama 1967, Förstner y Wittman 1979); y el caso de la enfermedad conocida con el nombre de “*Itai-itai*”, que resultó ser un caso severo de envenenamiento por Cd, en la cuenca del río Jinzu, en Toyama, Japón, derivado de la actividad minera para la obtención de Pb, Cu y Ni (Kobayashi 1978, Mance 1987).

El término metal pesado se aplica para aquellos elementos químicos metálicos con una densidad  $>5 \text{ g/cm}^3$ , y que por efecto de la actividad humana aumentan ostensiblemente su concentración en el medio, siendo causa de diversos problemas ambientales, como los expuestos en el párrafo anterior. La contaminación por MP es un grave problema ambiental debido a las propiedades persistentes y no biodegradables de estos contaminantes (Yuan et al. 2004). Las actividades humanas responsables del aumento de estos elementos en el medio son: el uso de fertilizantes, la quema de combustibles fósiles, la metalurgia, los efluentes de aguas residuales municipales y los residuos urbanos por citar algunos (Nriagu y Pacyna 1988). Los MP se encuentran entre los principales agentes de contaminación química que entran al medio marino (Páez-Osuna et al. 1986, Villanueva y Botello 1998), lo cual representa un problema común en regiones costeras de nuestro país como en el

---

---

Golfo de México (Álvarez et al. 1986, Villanueva y Botello 1992, González 1995, Villanueva y Páez 1996).

El Golfo de México, es una cuenca semicerrada que comunica al océano Atlántico por el Este a través de Yucatán y el estrecho de Florida, y es considerada una de las cuencas mediterráneas más contaminadas a nivel mundial (Botello et al. 1996, Villanueva y Botello 1998, Horta-Puga 2007). Existen ciudades costeras importantes que se desarrollan en sus litorales, como son Matamoros, Cd. del Carmen, Campeche, Coatzacoalcos, Minatitlán, Tampico, Tuxpan, Villahermosa y Veracruz, las cuales llegan a tener  $>1 \times 10^6$  habitantes (INEGI: <http://www.inegi.gob.mx>). En estas ciudades se generan residuos industriales y municipales que contribuyen con MP en la zona costera. Adicionalmente diversas cuencas fluviales como los ríos Mississippi, Bravo, Pánuco, Coatzacoalcos, Jamapa, Grijalva y Palizada por mencionar algunos, pueden acarrear metales pesados desde el continente (Villanueva y Botello 1998, Vázquez-Botello et al. 2004). Otros factores como los vientos son un medio de transporte de aerosoles ricos en MP que se generan en zonas industriales y urbanas alejadas de la costa, estos pueden llegar al océano y también contribuir al pool oceánico de MP en el Golfo de México (Nriagu 1979, Horta-Puga y Ramírez-Palacios 1996, Rosales-Hoz et al. 2009). En nuestro país en la planicie costera del golfo, que abarca los estados de Tamaulipas, Veracruz, Tabasco, Campeche y Yucatán, existen núcleos urbanos importantes en donde se desarrollan intensas actividades industriales presentes como la textil, papelera, fertilizantes, pinturas, petroquímica y metalúrgica las cuales en general el destino final de sus desechos y aguas residuales son el océano, contribuyendo a acrecentar los niveles ambientales de MP en el sur del Golfo de México (SGM) (Macías-



---

---

Zamora et al. 1999, Vázquez y Sharma 2004, Vázquez-Botello et al. 2004). A la fecha se han publicado numerosos trabajos sobre la concentración de metales pesados en diversos organismos, (ostión, moluscos, peces y macroalgas), sedimentos estuarinos y marinos en diversas zonas, entre los que destacan los realizados en la Laguna de San Andrés en Tamaulipas, la Laguna de Términos en Campeche y en los ríos Blanco, Coatzacoalcos y Laguna de Alvarado en Veracruz, los cuales apuntan a señalar al SGM como un área contaminada (Álvarez et al. 1986, Botello y Páez-Osuna 1984, Páez-Osuna et al. 1986, Rosales et al. 1986, Ponce y Botello 1992, Vázquez et al. 2001, Rosales-Hoz et al. 2003, Vázquez-Sauceda et al. 2005).

El Sistema Arrecifal Veracruzano (SAV) es un complejo Arrecifal ubicado en el SGM frente a la Ciudad de Veracruz, considerado como uno de los puertos más importantes en el Golfo de México (Figura 1). Este sistema está constituido por 25 arrecifes de plataforma y costero, que se dividen en dos grupos: norte y sur, por la influencia del río Jamapa (Heilprin 1890, Ferré-D'Amare 1985, Carricart-Ganivet y Horta-Puga 1993, Vargas-Hernández et al. 1993). El SAV está influenciado por numerosos efluentes como son los ríos Papaloapan, La Antigua y principalmente por la descarga del río Jamapa, que potencialmente acarrea numerosos contaminantes a la zona costera derivados de la intensa actividad agrícola, pecuaria, industrial y urbana (Horta-Puga 2007, Rosales-Hoz 2009). Por su importancia en 1992 el SAV fue declarado como un Parque Nacional y ahora es un área natural protegida (Diario Oficial de la Federación 1992). Debido a su ubicación, el SAV está sometido a una intensa influencia de las actividades humanas entre las que destacan la sobrepesca, el buceo recreativo, el turismo, el encallamiento y anclaje de buques, efluentes de aguas residuales

---

---

municipales, agrícolas e industriales, derrame de petróleo y otros contaminantes químicos. Lo anterior ha contribuido a elevar los niveles de MP y así llegar a ser considerado como uno de los ecosistemas arrecifales con mayor grado de impacto ambiental (Tunnell 1992, Vargas-Hernández et al. 1993, Horta-Puga 2007). Aunado a todo lo mencionado anteriormente, las zonas costeras y el puerto de Veracruz es uno de los más importantes económicamente para la ciudad y nuestro país, han ido creciendo paulatinamente durante las últimas décadas, acrecentando el problema. Los MP llegan a las zonas costeras por medio de una gran variedad de fuentes tanto naturales como antropogénicas y muchos de estos son acumulados principalmente en los sedimentos superficiales (Luoma 1989).

Los sedimentos oceánicos son heterogéneos en consideración a su composición, estos varían en gran medida en el tamaño de las partículas, origen, tasa de sedimentación y distribución geográfica. De acuerdo al origen y formación de los componentes se pueden distinguir varios tipos de sedimentos: litogénicos, autigénicos y biogénicos (Libes 2009). Los sedimentos biogénicos se constituyen de la depositación de restos y fragmentos de diversos organismos, un ejemplo de esto son los sedimentos arrecifales, que son los restos del esqueleto de  $\text{CaCO}_3$  de corales hermatípicos (Chave 1962). Los sedimentos son la principal fuente de depósito de muchos metales y pueden acumularse progresivamente en él, además de fungir un importante papel en el transporte y almacenamiento de metales potencialmente peligrosos (Yuan et al. 2004, Coung y Obbard 2006). La movilidad de los metales, del sedimento a la columna de agua y su consecuente biodisponibilidad y toxicidad a la vida marina depende de su particionamiento geoquímico (Jara-Marini et al. 2008). Los sedimentos en general están compuestos por minerales, carbonatos, oxi-hidróxidos

---

---

metálicos, y materiales orgánicos, constituyendo las diferentes fracciones geoquímicas (intercambiable, asociada a materia orgánica, asociada a carbonatos, asociada a óxidos e hidróxidos de Fe y Mn y Residual) (Tessier et al. 1979). A todas o cada una de estas fracciones (incluyendo la fracción intercambiable) se pueden incorporar MP, por varios mecanismos, tales como la adsorción de partículas en la superficie, intercambio iónico, coprecipitación, formación de complejos con sustancias orgánicas y por otros mecanismos naturales relacionados con las características fisicoquímicas de los sedimentos (Usero et al. 1998).

A pesar de que el SAV es por mucho el área más extensa de arrecifes del GM y de gran importancia desde el punto de vista ecológico, existen pocos estudios sobre la contaminación por MP en la zona. Algunos autores han determinado concentraciones de MP en diferentes organismos y sedimentos entre los que destacan: Tovar (2000) y Acosta (2002) que evaluaron MP en dos sistemas bentónicos arrecifales en la biota bentónica y macroalgas en los arrecifes La Gallega e Isla Verde. Noriega (2001) evaluó la concentración de MP de pastos marinos *Thalassia testudinum*. Morlán-Cahue y Opengo-Piña (2005) determinaron las concentraciones de Fe, Mn, Pb y Zn en ocho arrecifes del Grupo Norte del SAV utilizando macroalgas clorofitas. Sánchez (1994), evaluó los metales Cd, Co, Cu, Cr, Fe, Mn, Ni, Pb y Zn en el coral pétreo *Madracis decactis* en el arrecife Isla Verde. Horta-Puga y Ramírez-Palacios (1996) determinaron el contenido total de Pb en las bandas anuales de crecimientos del coral Escleractinio *Montrastea annularis* del arrecife Anegada de Adentro. Rivera (2006) registró las concentraciones Cu, Ni, Pb, V y Fe en el agua de mar y en dos especies de corales del arrecife Isla Sacrificios. Rosales-Hoz et al.

---

---

(2007 y 2009) estudiaron las implicaciones ambientales y de distribución de MP en sedimentos superficiales de Isla Sacrificios. Carriquiry y Horta-Puga (2010) realizaron una reconstrucción de los cambios ambientales a largo plazo asociados a la actividad antropogénica, utilizando el registro de Ba/Ca de las bandas de crecimiento del coral *Montastraea faveolata*, encontrando que existía una correlación entre la concentración de Ba y las descargas fluviales del Río Jamapa debido al cambio de uso de suelo, a excepción del periodo de 1975-1986 en donde los niveles aumentaron, atribuyendo esto al uso de barita utilizada en los pozos de extracción de petróleo proveniente de la zona petrolera de las costas del Golfo de Texas y Louisiana. Muchos de estos estudios se han limitado a sólo determinar la concentración total de los metales, sin embargo la concentración total no siempre nos provee de una información adecuada acerca de la biodisponibilidad y su potencial toxicidad del elemento, y el estudio de la proporción de cada elemento asociadas a las diferentes fracciones geoquímicas sedimentarias es ahora reconocida por ser una herramienta necesaria para obtener esta información (Mester et al. 1998, Soto-Jiménez y Páez-Osuna 2001, Abd El-Azim y El-Moselhy 2005).

Hasta el momento no existe ningún estudio que se enfoque a determinar el contenido de MP en sedimentos biogénicos en todo el SAV, ni la proporción de cada elemento asociadas a las diferentes fracciones geoquímicas sedimentarias. Sin embargo existen algunos otros trabajos en México y en muchas partes del mundo que utilizan a los sedimentos como indicadores de contaminación y además emplean un análisis fraccionario geoquímico por medio de una técnica de extracción secuencial para obtener una estimación realista del impacto actual en el ambiente. Dentro de los trabajos realizados en nuestro país podemos

---

---

mencionar los de Páez-Osuna y Osuna-López (1990) donde evaluaron la partición química del Zn en cinco diferentes fracciones geoquímicas en sedimentos del bajo Golfo de California en donde se mostró que el Zn presentó una mayor asociación a la fracción litogénica (60.6-73.2 %). Soto-Jiménez et al. (2001) y Jara-Marini et al. (2008) realizaron un estudio similar determinando la concentración de Cd, Cu, Pb y Zn y su biodisponibilidad química en sedimentos superficiales en el Puerto de Mazatlán en México, encontrando un incremento en las concentraciones de MP de 1983 a 1994 excepto para el Pb y el Cd los cuales disminuyeron en el periodo de tiempo de 1994 al 2006. En otras regiones del mundo podemos citar los trabajos hechos por Abd El-Azim y El-Moselhy (2005) que estudiaron la asociación química de cinco fracciones diferentes de MP en sedimentos del Canal de Suez encontrando concentraciones bajas en la fracción intercambiable indicando que los sedimentos de esa zona relativamente no están contaminados. Guevara-Riba et al. (2004) determinaron las concentraciones de seis MP y su partición química en sedimentos marinos de España encontrando altas concentraciones primordialmente en zonas que estaban bajo una mayor influencia antropogénica con un patrón de movilidad: Cd>Zn>Pb>Cu>Ni>Cr. Coung y Obbard (2006) realizaron una especiación química de los metales Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn en sedimentos marinos de Singapur encontrando concentraciones altas con un patrón de movilidad similar al trabajo mencionado anteriormente. Yuan et al. (2004) examinaron la partición química de 12 elementos en el mar del este de China, encontrando concentraciones extremadamente altas de Cd y Pb principalmente asociadas a las fracciones no residuales en los sedimentos superficiales.

Por todo lo antes mencionado, los sedimentos biogénicos del SAV pueden ser considerados como indicadores ideales para estudiar el proceso de contaminación por MP en el SGM. Considerando que el SAV presenta un alto grado de influencia humana y tomando en cuenta la capacidad de los sedimentos para acumular progresivamente metales, el presente trabajo tuvo como propósito determinar la concentración de Pb en sedimentos biogénicos carbonatados con ayuda de un análisis fraccionario geoquímico por medio de una técnica de extracción secuencial. Estos datos se utilizarán para determinar si el SAV es un área costera contaminada por MP.

### *1.1 Objetivo general*

Determinar el grado de contaminación del Sistema Arrecifal Veracruzano, con base en los niveles de metales pesados presentes en sedimentos carbonatados biogénicos.

### *1.2 Objetivos específicos*

Cuantificar la concentración de metales pesados en las diferentes fracciones geoquímicas (intercambiable, materia orgánica, asociada a carbonatos y residual o mineral) en sedimentos superficiales de los arrecifes que componen el Sistema Arrecifal Veracruzano.

Determinar si la zona costera frente al Puerto de Veracruz está contaminada por metales pesados.

---

---

## 2.- MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 *Área de estudio*

El Sistema Arrecifal Veracruzano es por mucho el área más extensa de arrecifes en el Golfo de México (GM) (Figura 1). Está constituido por 25 arrecifes de plataforma y costeros que se elevan desde profundidades de 40m hasta la superficie, construido en un banco de restos bioclásticos calcáreos de materiales coralinos pertenecientes al Pleistoceno Reciente. El SAV se divide en dos grupos de arrecifes dividido por la desembocadura del Río Jamapa, el Grupo Norte (**GN**) y Grupo Sur (**GS**). Los arrecifes del GN se localizan frente al Puerto de Veracruz y los arrecifes del GS se ubican frente a Punta Antón Lizardo (Carricart-Ganivet y Horta-Puga 1993, Vargas-Hernández et al. 1993, Tunnell et al. 2007). Los arrecifes del SAV son principalmente de tipo plataforma, su eje mayor está orientado en dirección NW-SE, debido a su orientación la turbulencia es mínima y sus aguas presentan una gran cantidad de material sólido en suspensión (Horta-Puga 2003, Carriquiry y Horta-Puga 2010).

El clima en la región suroeste del GM es de tipo Am (cálido y húmedo) con abundantes lluvias en el verano, parte del otoño, y un corto periodo de lluvias de abril a mayo. La precipitación promedio anual es de 1100-2000 mm y la temperatura promedio anual es de 26°C (Salas-Pérez y Granados-Barba 2008). El esquema climático del área de estudio

presenta una estacionalidad bien delimitada: lluvias (junio-octubre), nortes (octubre-marzo) y secas (marzo-mayo), las cuales pueden traslaparse o modificar su duración en cada ciclo anual (Carrillo et al. 2007).



**Figura 1. Sistema Arrecifal Veracruzano, Sur del Golfo de México. ● = Sitios de colecta de muestras.**

## 2.2 Estrategia del muestreo

Para poder determinar el grado de contaminación por Pb en el SAV se eligieron 15 sitios de muestreo, nueve arrecifes del Grupo Norte: Anegada de Adentro, Blanquilla, Gallega, Galleguilla, Hornos, Isla Verde, Pájaros, Punta Gorda y Sacrificios; y seis arrecifes del Grupo Sur: Anegada de Afuera, Cabezo, Chopas, Isla de Enmedio, La Blanca y Rizo. El



---

---

muestreo se llevó a cabo en el 2008. En cada arrecife se eligió sólo recolectar muestras de sedimento superficial, ya que estos son los que representan la condición actual del sistema (Loring y Rantala 1992). Para efectos comparativos, se realizaron dos campañas de muestreo, la primera en los días 18 y 19 del mes de junio (**M1**) (inicio de la temporada de lluvias), y la segunda se realizó los días 10 y 11 del mes de septiembre (**M2**) (final de la temporada de lluvias).

### *2.3 Recolección de muestras*

Las muestras de sedimento superficial se obtuvieron manualmente (~500 g) con una pala de plástico y se almacenaron en bolsas de polietileno, eliminando al máximo posible el agua del medio. Los sedimentos recolectados se colocaron en un congelador del Centro de Ecología y Pesquerías de la Universidad Veracruzana, y se transportaron congelados hasta el Laboratorio de Biogeoquímica (UBIPRO, FES Iztacala, UNAM) en donde de nuevo fueron congeladas a  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$  para su posterior procesamiento.

### *2.4 Procesamiento de muestras*

Todo el material utilizado en el laboratorio se lavó con agua y jabón y se enjuagó con agua deionizada (AD), el material de plástico se colocó en  $\text{HNO}_3$  al 10% y la cristalería en  $\text{HCl}$  al 10% durante 48 h, y se enjuagaron con AD con la finalidad de evitar cualquier agente contaminante que pudiera interferir con los resultados de este trabajo. Una vez en el laboratorio las muestras se descongelaron y secaron en un horno a  $60\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$  durante 48 hrs

---

---

para eliminar la humedad y sin alterar las propiedades químicas. A las muestras se les aplicó un pretratamiento para remover las sales del agua de mar precipitadas durante el procesamiento de secado, siguiendo la metodología que se describe a continuación, propuesta por Loring y Rantala (1992). Las muestras secas se tamizaron (~20g) usando un tamiz de polietileno con luz de malla 2mm para obtener una fracción fina, la fracción retenida en el tamiz se desechó y la fracción residual se homogenizó utilizando un mortero ágata y se almacenaron en un frasco de polietileno con tapa. Posteriormente se separó una alícuota de ~2g de sedimento y se colocó en un tubo de polietileno de 50 ml con tapa, al tubo se le añadieron 40 ml de AD y se agitó durante 15 min a 120 rpm en un agitador orbital. Cada muestra se centrifugó por 45 min a 10,000 rpm y se desechó el sobrenadante. Este último paso se repitió en total tres veces. Por último las muestras se secaron nuevamente en un horno a  $60\pm 1$  °C durante 48 h y se almacenaron en un frasco de polietileno debidamente etiquetado para su posterior análisis.

### *2.5 Método de extracción secuencial*

Para la extracción de MP asociados a las diferentes fracciones geoquímicas, se utilizó un protocolo similar al desarrollado por Shen y Boyle (1988) para carbonatos biogénicos, pero siguiendo los lineamientos marcados por Tessier et al. (1979) y Gulmini et al. (1994), obteniendo cuatro fracciones: intercambiable, ligada a materia orgánica, ligada a carbonatos y residual.

---

---

Las cuatro fracciones geoquímicas sedimentarias se separaron de manera secuencial de la siguiente forma:

**(F1)** Fracción intercambiable. Se pesó 1g de muestra de sedimento seco y se colocó en un tubo de polipropileno de 50 ml, se añadió una alícuota de 10 ml de solución 1M de acetato de amonio [ $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ ] ajustado a  $\text{pH} \approx 7$ , la mezcla se agitó a 120 rpm durante 1 h a temperatura ambiente. Posteriormente el extracto fue separado por centrifugación a 10,000 rpm por 45 min y el sobrenadante se vertió cuidadosamente en un matraz volumétrico de 25 ml. La muestra se resuspendió con 5 ml de AD y se agitó durante 5 min para ser nuevamente centrifugada a 10,000 rpm por 45 min, el sobrenadante se vació en el mismo matraz volumétrico y se aforó con solución 1 M de acetato de amonio. El residuo sólido se agitó con 5 ml de AD y se centrifugó bajo las condiciones antes mencionadas y el sobrenadante se desechó.

**(F2)** Fracción asociada a materia orgánica. Al residuo de la fracción anterior se añadió una alícuota de 5 ml de solución oxidante ( $\text{H}_2\text{O}_2$  30% y NaOH 0.2 M 1:1), se calentó a 85 °C en baño maría por 2 hrs, agitando ocasionalmente. Transcurrido el tiempo se añadió una segunda alícuota de solución oxidante y se continuó calentando durante 2 hrs más, sin dejar de agitar frecuentemente. La mezcla se centrifugó (10,000 rpm, por 45 min) y el sobrenadante se vació en un matraz volumétrico de 25 ml, a la muestra se agregaron 5 ml de AD se agitó por 5 min a 120 rpm y se centrifugó (10,000 rpm, por 45 min), el sobrenadante se vació en el mismo matraz volumétrico aforando con solución 2%  $\text{HNO}_3$ .

Posteriormente se añadieron 5 ml de AD agitando por 5 min a 120 rpm, se centrifugó (10,000 rpm, 45 min) y el sobrenadante se descartó.

(F3) Fracción asociada a carbonatos. Al residuo del procedimiento anterior se le agregaron cuidadosamente por goteo 10 ml de solución acida ( $\text{HCl}_{\text{conc}}$  y AD 1:1) y se dejó reposar 30 min. Al tubo se adicionaron 5 ml de AD, se agitó por 5 min a 120 rpm y se centrifugó (10,000 rpm, por 45 min), vertiendo el sobrenadante en un matraz volumétrico de 25 ml. Este último paso se repitió una vez y el sobrenadante se depositó en el mismo matraz volumétrico aforando con solución de  $\text{HNO}_3$  2%.

(F4) Fracción residual. Para obtener esta fracción se realizó una digestión química que se llevó a cabo en un horno de microondas CEM MDS 2100. Al tubo que contiene el residuo de la muestra de la fracción anterior se le añadió 5 ml de AD, se agitó manualmente por 30 segundos y se colocó el contenido en un vaso de digestión, se agregaron nuevamente 5 ml de AD siguiendo los pasos anteriores para asegurarse de depositar todo el residuo sólido, posteriormente en el vaso de digestión se depositaron subsecuentemente 5 ml de  $\text{HNO}_{3\text{conc}}$ , 4 ml de  $\text{HF}_{\text{conc}}$  y 1 ml de  $\text{HCl}_{\text{conc}}$ . Para la digestión de cada muestra se empleó un programa específico de tiempos, temperatura y presión modificada del programa del manual del equipo (Tabla 1).

**Tabla 1**  
**Programa de digestión del horno de microondas para sedimentos biogénicos**

Condición/Fase	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3
Poder (%)	70	70	70
Presión (PSI)	40	85	150
Rampa (min)	6	6	10
Tiempo (min)	5	5	10

PSI = libras de presión a las que se somete la muestra. Rampa = tiempo en el que incrementa la presión. Tiempo = Tiempo en el que se mantiene constante la presión requerida.

Posterior a la digestión se le agregó 2 g de  $H_3BO_3$  a la muestra y se continuó con la digestión por 5 min más. Por último la muestra se colocó en un matraz volumétrico de 25 ml y se aforó con solución  $HNO_3$  2%. La digestión química se hizo para liberar los elementos metálicos de todo posible enlace y así fueran determinables en el Espectrofotómetro de Absorción Atómica, ya que esta fracción se compone de silicatos y otros minerales que retienen elementos en sus estructuras cristalinas. Todas las muestras en las cuatro etapas de fraccionamiento se trasladaron en frascos de polipropileno y se preservaron a una temperatura de 4 °C, hasta el análisis instrumental.

### *2.6 Análisis químico instrumental de MP*

La cuantificación de Pb en las cuatro fracciones y contenido total se determinó por medio de Espectrofotometría de Absorción Atómica a la flama (**EAA**) con ayuda de un espectrofotómetro Varian SpectrAA 800, acoplado a un atomizador electrotérmico (Varian GTA 100). Esta es una técnica cuantitativa de análisis químico y consiste en vaporizar la muestra a una temperatura alta y la concentración de átomos se lleva a cabo midiendo la absorción o la emisión en sus longitudes de onda característica. Para el análisis se realizó una curva de calibración utilizando blancos, soluciones cero y estándar, elaboradas a partir

de una solución patrón sigma de 1000 ppm y finalmente se efectuó la lectura de absorbancia de cada muestra. Para el procesamiento de datos se hicieron los cálculos pertinentes para obtener los valores en  $\mu\text{g/g}$  de peso seco.

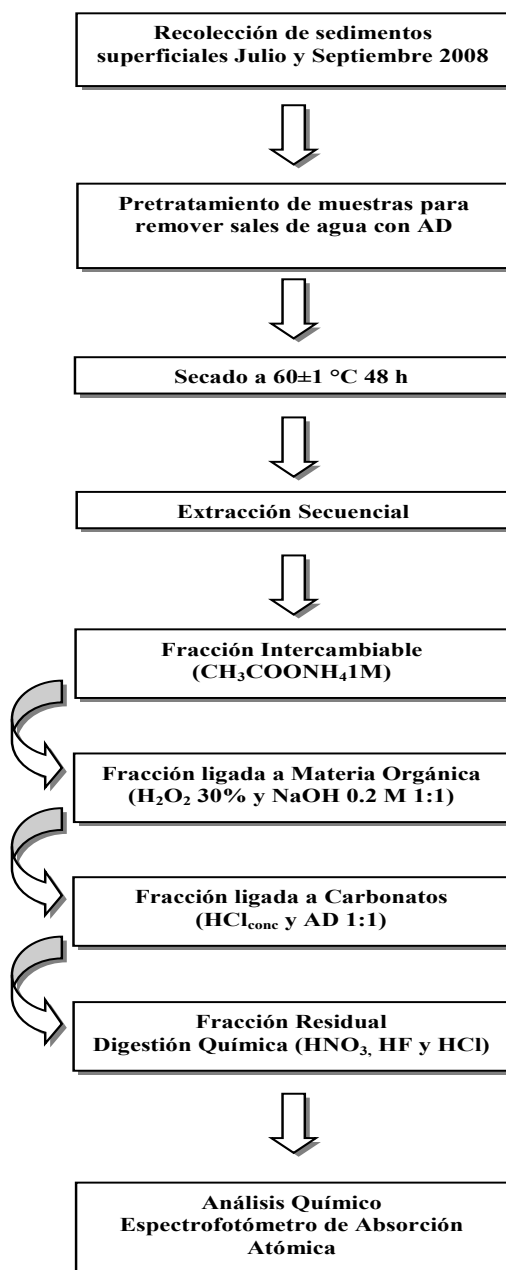


Figura 2. Diagrama de flujo de la metodología.

### **3.- RESULTADOS**

Para obtener una mejor estimación del actual impacto por Pb en el ambiente se utilizó una técnica de extracción secuencial, la cuál nos permite recopilar información sobre la movilidad y disponibilidad del elemento en el sedimento. El principio de esta técnica esta basado en la extracción selectiva de un metal en diferentes fracciones fisicoquímicas de un material utilizando un solvente específico (Tessier et al. 1979). Para este estudio se determinaron los niveles de Pb en cuatro fracciones geoquímicas.

**Tabla 2**  
**Concentración de Pb en fracciones geoquímicas sedimentarias en sedimentos arrecifales superficiales en la temporada de inicio de lluvias (M1) del SAV ( $\mu\text{g/g}$  pesos seco)**

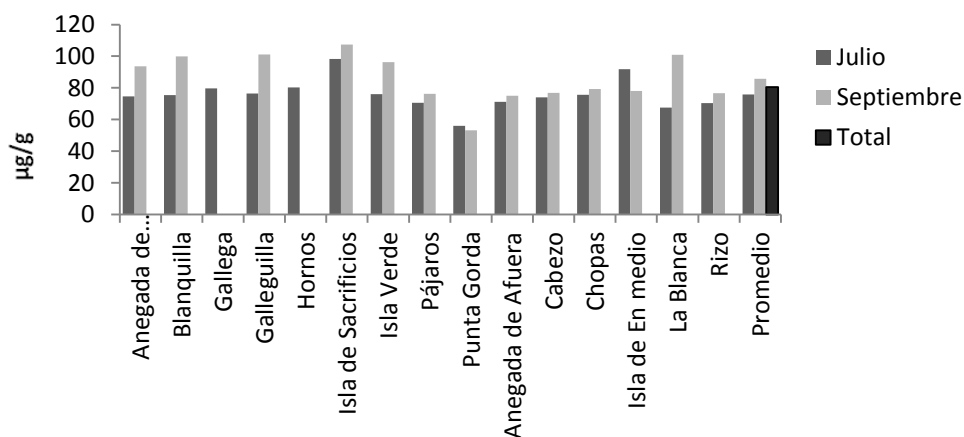
	Arrecifes	F1	F2	F3	F4	Suma Total
<b>GRUPO NORTE</b>	Anegada de Adentro	5.0	2.7	53.7	13.2	74.7
	Blanquilla	3.5	1.2	52.7	18.0	75.4
	Galleguilla	4.2	0.2	54.7	17.2	76.4
	Isla de Sacrificios	4.2	0.7	79.0	14.2	98.2
	Isla Verde	4.7	4.0	53.0	14.2	76.0
	Pájaros	3.7	0.7	52.2	13.7	70.5
	Punta Gorda	4.2	1.2	16.5	34.0	55.9
Promedio ( $\pm 1\sigma$ )		4.2 $\pm$ 0.48	1.6 $\pm$ 1.24	51.7 $\pm$ 16.9	17.8 $\pm$ 6.83	75.3 $\pm$ 11.50
<b>GRUPO SUR</b>	Anegada de Afuera	3.7	1.2	53.5	12.7	71.2
	Cabezo	4.0	1.7	54.2	14.0	74.0
	Chopas	3.7	2.2	53.4	16.2	75.7
	Isla de En medio	4.0	1.7	70.9	15.2	91.9
	La Blanca	3.5	0.2	51.9	12.0	67.6
	Rizo	3.5	1.7	54.4	10.7	70.4
Promedio ( $\pm 1\sigma$ )		3.7 $\pm$ 0.21	1.5 $\pm$ 0.63	56.4 $\pm$ 6.54	13.5 $\pm$ 1.88	75.1 $\pm$ 7.93
Promedio Total		4.0 $\pm$ 0.45	1.5 $\pm$ 1.01	53.9 $\pm$ 13.38	15.8 $\pm$ 5.60	75.2 $\pm$ 10.01

F1= Fracción intercambiable. F2= Fracción asociada a materia orgánica. F3= Fracción asociada a carbonatos. F4= Fracción residual.

Las Tablas 2, 3 y 4 muestran las concentraciones de Pb de las cuatro fracciones geoquímicas, la suma total de las fracciones y los promedios totales en el sedimento de cada sitio de colecta para ambas campañas de muestreo en los meses de junio (M1) y septiembre (M2), además de estar divididos para efectos de comparación en GN y GS. En el caso de los arrecifes Hornos y Gallega pertenecientes al GN no se obtuvieron muestras en el M1, debido a las malas condiciones del clima. La concentración total promedio obtenida para todo el SAV en los dos muestreos fue de  $80.4 \pm 13.2 \mu\text{g/g}$ . Al comparar los resultados por muestreo se puede observar que los niveles promedio en la suma total de Pb del M2 ( $85.0 \pm 13.87 \mu\text{g/g}$ ) son mayores con respecto al M1 ( $75.2 \pm 10.01 \mu\text{g/g}$ ), presentando



una diferencia estadísticamente significativa (Mann-Whitney:  $U= 159$ ,  $p= 0.005$ ). Asimismo, las concentraciones promedio por grupo arrecifal en ambas campañas fueron mayores en el GN ( $82.2\pm 15.4 \mu\text{g/g}$ ), sin embargo no se presentaron diferencias significativas con respecto al GS (Mann-Whitney:  $U= 75$ ,  $p= 0.3421$ ). Por otro lado al comparar los niveles encontrados por grupos en cada campaña de muestreo, en el M1 el GN presentó una concentración mayor  $75.3\pm 11.5 \mu\text{g/g}$  a la del GS  $75.1\pm 7.9$ , no obstante la diferencia no fue estadísticamente significativa (Mann-Whitney:  $U= 16$ ,  $p= 0.5222$ ), y de igual manera en el M2 el GN tuvo un valor más alto  $87.5\pm 15.8$  a la del GS  $81.1\pm 8.9$ , sin presentar diferencias estadísticamente significativas (Mann-Whitney:  $U= 16$ ,  $p= 0.215$ ). Analizando los resultados por arrecife se observa que Isla Sacrificios presentó los niveles de Pb más altos en las dos campañas de muestreo con concentraciones de  $98.2 \mu\text{g/g}$  en el M1 y  $107.3 \mu\text{g/g}$  en el M2; en cambio, el arrecife Punta Gorda obtuvo los valores más bajos con  $55.9 \mu\text{g/g}$  y  $53.2 \mu\text{g/g}$  en el M1 y M2, respectivamente (Figura 2).



**Figura 2. Suma total de Pb ( $\mu\text{g/g}$ ) en sedimentos arrecifales superficiales por temporada de muestreo en los arrecifes del SAV.**

**Tabla 3**  
**Concentración de Pb en fracciones geoquímicas sedimentarias en sedimentos**  
**arrecifales superficiales en la temporada de término de lluvias (M2) del SAV ( $\mu\text{g/g}$**   
**peso seco)**

	Arrecifes	F1	F2	F3	F4	Suma Total
<b>GRUPO NORTE</b>	Anegada de Adentro	3.2	0.7	74.4	15.2	93.7
	Blanquilla	4.0	2.5	74.9	18.5	99.9
	Gallega	4.5	3.2	55.7	16.2	79.7
	Galleguilla	3.5	1.2	77.9	18.5	101.1
	Hornos	4.0	4.2	44.2	27.7	80.2
	Isla de Sacrificios	3.5	2.7	79.4	21.7	107.3
	Isla Verde	4.5	1.2	73.0	17.5	96.2
	Pájaros	3.2	2.0	56.5	14.5	76.2
	Punta Gorda	2.2	3.2	17.5	30.2	53.2
Promedio( $\pm 1\sigma$ )		3.6 $\pm$ 0.69	2.4 $\pm$ 1.08	61.5 $\pm$ 19.33	20 $\pm$ 5.21	87.5 $\pm$ 15.86
<b>GRUPO SUR</b>	Anegada de Afuera	3.5	1.2	56.9	13.5	75.1
	Cabezo	3.7	1.5	55.2	16.5	76.9
	Chopas	3.5	2.7	54.5	18.5	79.2
	Isla de Enmedio	3.5	2.2	56.2	16.0	78.0
	La Blanca	3.2	1.7	77.4	18.5	100.9
	Rizo	3.5	2.0	57.4	13.7	76.7
Promedio( $\pm 1\sigma$ )		3.5 $\pm$ 0.15	1.9 $\pm$ 0.49	59.6 $\pm$ 8.02	16.1 $\pm$ 2.01	81.1 $\pm$ 8.93
Promedio Total		3.6 $\pm$ 0.54	2.2 $\pm$ 0.92	60.7 $\pm$ 15.83	18.5 $\pm$ 4.64	85.0 $\pm$ 13.87

F1= Fracción intercambiable. F2= Fracción asociada a materia orgánica. F3= Fracción asociada a carbonatos. F4= Fracción residual.

**Tabla 4**  
**Niveles promedio ( $\pm 1\sigma$ ) de Pb por grupo arrecifal y temporada de muestreo en sedimentos arrecifales superficiales en el SAV**

Grupo/Muestreo	Fecha	F1	F2	F3	F4	Suma total
M1	Jul-08	4.0 $\pm$ 0.4	1.5 $\pm$ 1.0	53.9 $\pm$ 13.3	15.8 $\pm$ 5.6	75.2 $\pm$ 10.0
M2	Sep-08	3.6 $\pm$ 0.5	2.2 $\pm$ 0.9	60.7 $\pm$ 15.8	18.5 $\pm$ 4.6	85.0 $\pm$ 13.8
GN	Jul-08	4.2 $\pm$ 0.4	1.6 $\pm$ 1.2	51.7 $\pm$ 16.9	17.8 $\pm$ 6.8	75.3 $\pm$ 11.5
GN	Sep-08	3.6 $\pm$ 0.6	2.4 $\pm$ 1.0	61.5 $\pm$ 19.3	20 $\pm$ 5.21	87.5 $\pm$ 15.8
GN	T	3.9 $\pm$ 0.7	2.0 $\pm$ 1.2	57.2 $\pm$ 18.9	19.0 $\pm$ 6.1	82.2 $\pm$ 15.4
GS	Jul-08	3.7 $\pm$ 0.2	1.5 $\pm$ 0.6	56.4 $\pm$ 6.5	13.5 $\pm$ 1.8	75.1 $\pm$ 7.9
GS	Sep-08	3.5 $\pm$ 0.1	1.9 $\pm$ 0.4	59.6 $\pm$ 8.0	16.1 $\pm$ 2.0	81.1 $\pm$ 8.9
GS	T	3.6 $\pm$ 0.2	1.7 $\pm$ 0.6	58.0 $\pm$ 7.5	14.8 $\pm$ 2.4	78.1 $\pm$ 9.0
SAV	T	3.8 $\pm$ 0.5	1.8 $\pm$ 1.0	57.5 $\pm$ 15.1	17.2 $\pm$ 5.3	80.4 $\pm$ 13.2

GN= Grupo Norte. GS= Grupo Sur. T= Total. M1= Campaña de muestreo Junio/08. M2= Campaña de muestreo Septiembre/08.

La Figura 3, muestra para todos los arrecifes, la proporción de Pb asociado a cada una de las fracciones geoquímicas sedimentarias. El orden de concentración general fue:

**Carbonatos >Residual >Intercambiable >Materia Orgánica**

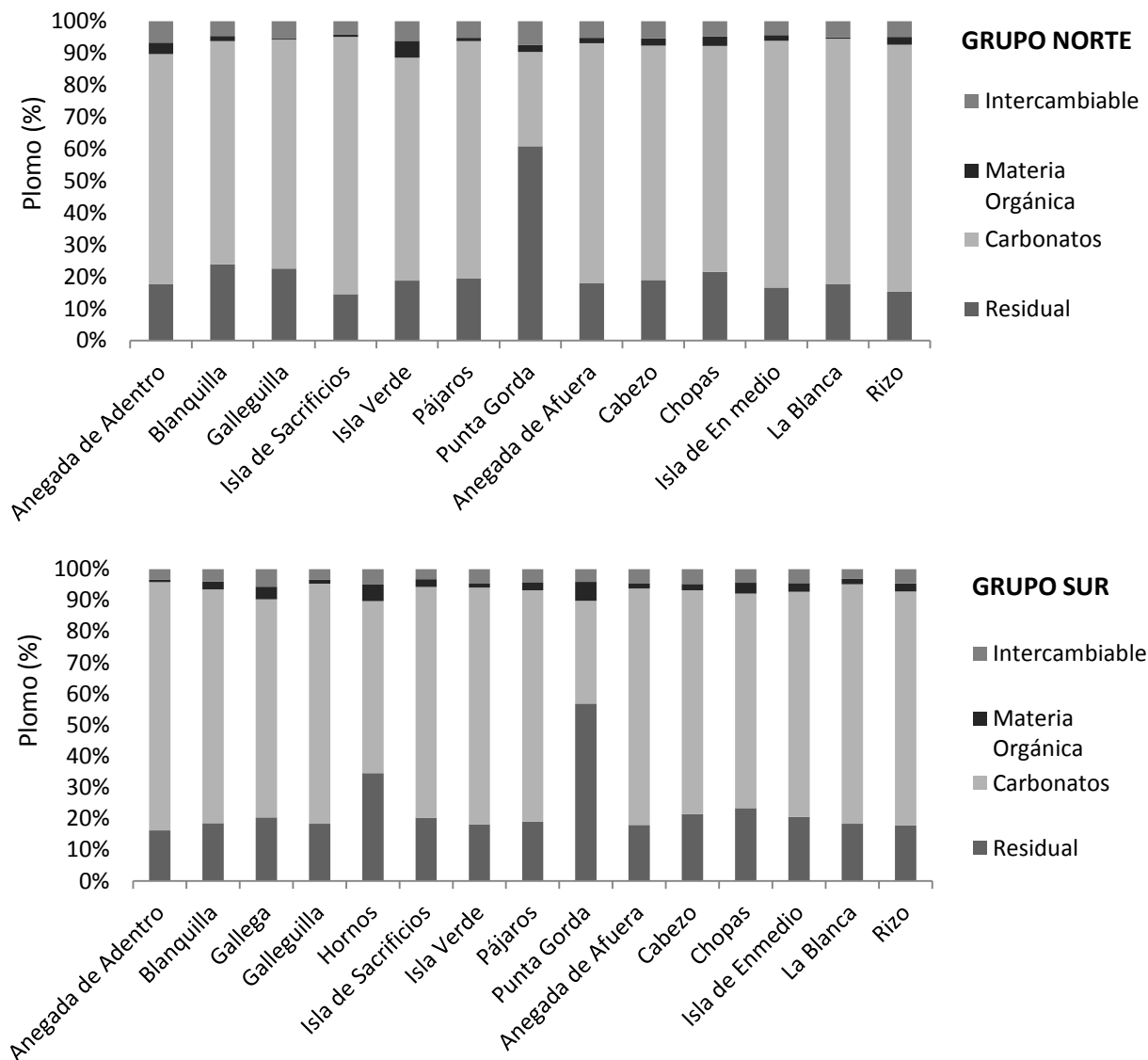
Este orden en las concentraciones se mantuvo prácticamente en todos los sitios de muestreo, excepto en los arrecifes Hornos y Punta Gorda para ambos muestreos. En términos generales las proporciones promedio fueron:

$$Pb_{\text{Carbonatos}} = 71.8 \pm 3.7\%$$

$$Pb_{\text{Residual}} = 21.1 \pm 2.4 \%$$

$$Pb_{\text{Intercambiable}} = 4.7 \pm 0.3 \%$$

$$Pb_{\text{Materia Orgánica}} = 2.3 \pm 0.4 \%$$



**Figura 3. Distribución de Pb en las fracciones geoquímicas sedimentarias en sedimentos arrecifales superficiales por temporada de muestreo en el SAV.**

### 3.1 Fracción intercambiable

En la F1 se presentó una concentración promedio total de Pb para todo el SAV de  $3.8 \pm 0.5$   $\mu\text{g/g}$ . Al comparar los resultados promedio durante el M1 ( $4.0 \pm 0.4$   $\mu\text{g/g}$ ) y el M2 ( $3.6 \pm 0.5$   $\mu\text{g/g}$ ), estos resultaron diferentes, y la diferencia fue estadísticamente significativa (Mann-

---

---

Whitney:  $U= 49.5$ ,  $p= 0.0285$ ). Los niveles promedio fueron mayores en el GN ( $3.9\pm 0.7$   $\mu\text{g/g}$ ) con respecto al GS ( $3.6\pm 0.2$   $\mu\text{g/g}$ ); sin embargo la diferencia no fue estadísticamente significativa (Mann-Whitney:  $U= 64.5$ ,  $p= 0.1499$ ). El arrecife Anegada de Adentro presentó la concentración más alta con  $5.0$   $\mu\text{g/g}$  y los valores más bajos se encontraron en los arrecifes Blanquilla, La Blanca y Rizo  $3.5$   $\mu\text{g/g}$  en el M1, mientras que en el M2 los arrecifes Isla Verde y Gallega exhibieron los valores más altos con  $4.5$   $\mu\text{g/g}$ , y Punta Gorda el más bajo  $2.2$   $\mu\text{g/g}$ .

### *3.2 Fracción asociada a materia orgánica*

En la F2 el nivel promedio total en todo el SAV fue de  $1.8\pm 1.0$   $\mu\text{g/g}$ . El M2 mostró un valor promedio de  $2.2\pm 0.9$   $\mu\text{g/g}$ , y en el M1 fue  $1.5\pm 1.0$   $\mu\text{g/g}$ , la diferencia no fue significativa (Mann-Whitney:  $U= 136.5$ ,  $p= 0.0767$ ). Realizando la comparación entre grupos arrecifales, el GN presentó el valor promedio más alto  $2.0\pm 1.2$   $\mu\text{g/g}$  ante el GS  $1.7\pm 0.6$   $\mu\text{g/g}$ , no obstante, no hubo diferencias significativas entre ellos (Mann-Whitney:  $U= 90$ ,  $p= 0.7949$ ). En la M1 el arrecife Isla Verde mostró el valor más alto  $4.0$   $\mu\text{g/g}$  y los arrecifes de Galleguilla y La Blanca los más bajos  $0.2$   $\mu\text{g/g}$  respectivamente, mientras que para el M2, Hornos obtuvo el mayor nivel  $4.2$   $\mu\text{g/g}$  y Anegada de Adentro el más bajo  $0.7$   $\mu\text{g/g}$  (Tabla 4).

---

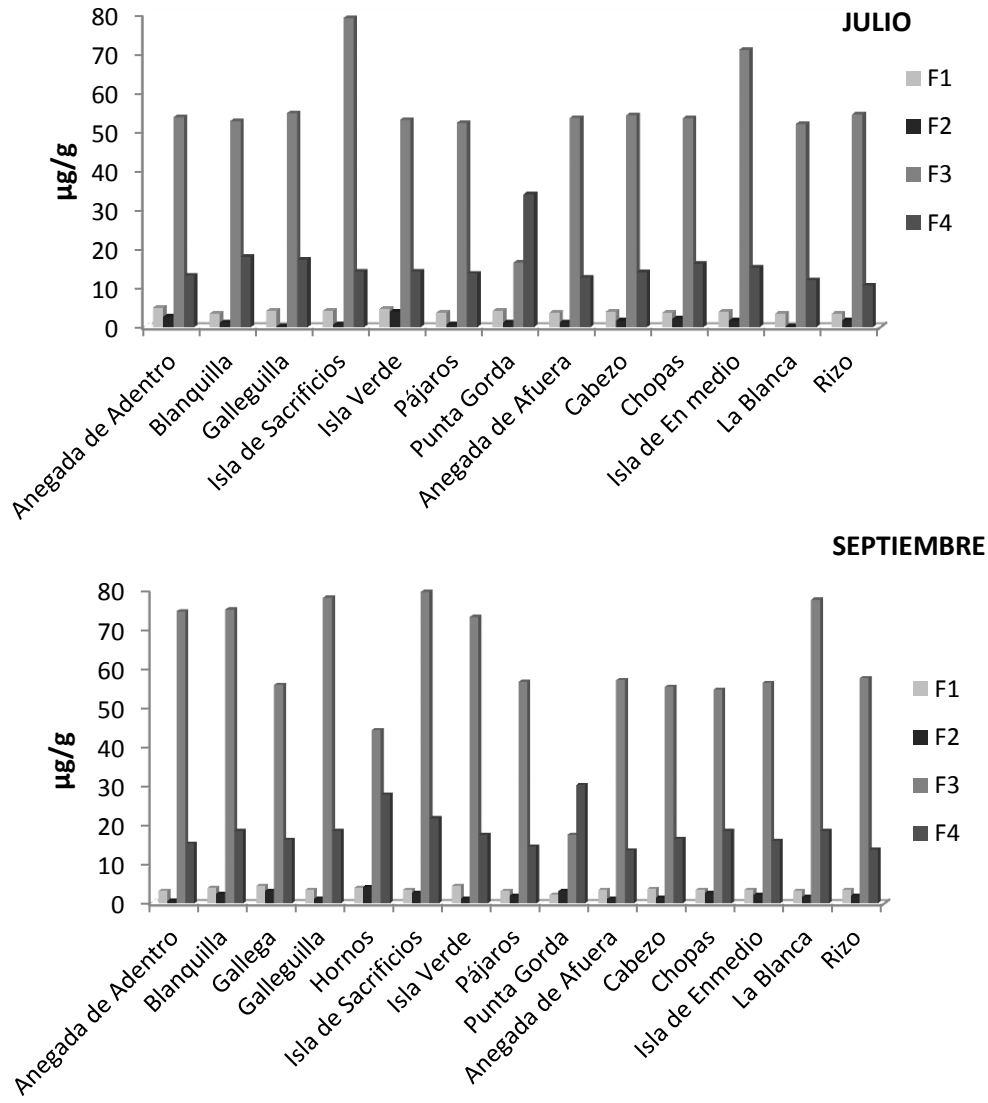
---

### 3.3 Fracción asociada a carbonatos

En la F3 el resultado promedio total en el SAV fue de  $57.5 \pm 15.1$   $\mu\text{g/g}$ . Examinando los resultados entre muestreos, el M2 presentó un valor promedio más alto  $60.7 \pm 15.8$   $\mu\text{g/g}$  ante el M1  $53.9 \pm 13.3$   $\mu\text{g/g}$ , teniendo diferencias estadísticamente significativas (Mann-Whitney:  $U = 151$ ,  $p = 0.0147$ ). En esta fracción el GS obtuvo el nivel promedio más alto  $58.0 \pm 7.5$   $\mu\text{g/g}$ , y el GN tuvo el promedio más bajo  $57.2 \pm 18.9$   $\mu\text{g/g}$ , sin embargo las diferencias no fueron significativas (Mann-Whitney:  $U = 96$ ,  $p = 0.984$ ). Los niveles presentes por arrecife en la M1 fueron de  $16.5$   $\mu\text{g/g}$  en Punta Gorda a  $79.0$   $\mu\text{g/g}$  en Isla de Sacrificios, del mismo modo en la M2 los valores fueron de  $17.5$   $\mu\text{g/g}$  en Punta Gorda a  $79.4$   $\mu\text{g/g}$  en Isla Sacrificios.

### 3.4 Fracción residual o mineral

En la F4 la concentración promedio total en el SAV fue de  $17.2 \pm 5.3$   $\mu\text{g/g}$ . Al evaluar los niveles promedio de Pb presentes en la M1  $15.8 \pm 5.6$   $\mu\text{g/g}$ , con el M2  $18.5 \pm 4.6$   $\mu\text{g/g}$ , resultando ser estadísticamente diferentes (Mann-Whitney:  $U = 148.5$ ,  $p = 0.0198$ ). De igual forma los valores promedio entre el GN  $19.0 \pm 6.1$   $\mu\text{g/g}$  y el GS  $14.8 \pm 2.4$   $\mu\text{g/g}$  reflejaron ser diferentes estadísticamente (Mann-Whitney:  $U = 51.5$ ,  $p = 0.0414$ ). Por otro lado, valorando las concentraciones por sitio de muestreo en el M1 el arrecife Punta Gorda presentó la más alta  $34.0$   $\mu\text{g/g}$  y Rizo la más baja  $10.7$   $\mu\text{g/g}$ , igualmente en la M2 Punta Gorda mostró el nivel más alto  $30.2$   $\mu\text{g/g}$  y Anegada de Afuera el más bajo  $13.5$   $\mu\text{g/g}$ .



**Figura 4. Concentraciones de Pb en las fracciones geoquímicas sedimentarias en sedimentos arrecifales superficiales del SAV.**

---

---

#### 4.- DISCUSIÓN

Los sedimentos han sido una herramienta ampliamente utilizada como indicadores de contaminación en las zonas costeras por su capacidad de actuar como agentes quelantes (Botello y Páez-Osuna 1984, Guzmán y Jiménez 1992, Esslemont 2000, Rosales-Hoz 2007), son considerados la principal fuente de depósito en el medio marino porque juegan un papel importante en el transporte y almacenamiento de MP (Abu-Hilal 1993, Coung y Obbard 2006, Yuan et al. 2004).

Las concentraciones de Pb registradas en este estudio se compararon con los valores reportados en otras regiones consideradas como no contaminadas, así como también zonas influenciadas por una alta actividad antropogénica. Los valores obtenidos se compararon con las concentraciones promedio de Pb de sedimentos superficiales en México y en otras regiones del mundo (Tabla 5). La concentración promedio total de Pb registrada en todo el SAV fue de  $80.4 \pm 13.2 \mu\text{g/g}$ . Al comparar los resultados para determinar si existían diferencias ambientales en la concentración de Pb por campaña de muestreo, los niveles presentes en la M2 resultaron ser mayores (fin temporada de lluvias) ( $85.0 \pm 13.87 \mu\text{g/g}$ ) con respecto a la M1 (inicio temporada de lluvias) ( $75.2 \pm 10.01 \mu\text{g/g}$ ), presentándose diferencias estadísticamente significativas (Mann-Whitney:  $U= 159$ ,  $p= 0.005$ ), lo que implica que existe un gradiente ambiental en el aumento de la concentración de Pb. Probablemente esto



---

---

se atribuya a que durante la M1 existe un mayor aporte fluvial (Río Jamapa) ocasionando un aumento en la cantidad de sólidos en suspensión y de contaminantes, provenientes del acarreo de aguas residuales y de varios asentamientos industriales y urbanos de la ciudad de Veracruz (Horta-Puga 2007, Rosales-Hoz 2009). Los sólidos en suspensión como minerales arcillosos, oxihidróxidos de metales y materia orgánica particulada, tienen la capacidad de adsorber cationes libres, ya que poseen una carga negativa neta que atrae electrostáticamente por sus superficies a los cationes metálicos, a este proceso se le denomina en inglés como “Scavenging” y es una de las principales vías por la cual las partículas pueden incorporarse con materiales biogénicos. Este acontecimiento depende de la naturaleza del elemento, la abundancia de materia orgánica, concentración de otros solutos y la profundidad del agua (Libes 2009). Por lo tanto, debido a que durante la temporada de lluvias (junio-septiembre) la cantidad de materia orgánica particulada aumenta en el SAV, esto podría ocasionar que el proceso de “Scavenging”, indujera una acumulación de MP al término de la temporada de lluvias en los sedimentos. Estos resultados coinciden con los obtenidos por Rosales-Hoz et al. (2007) en los cuales encontró las concentraciones más altas de MP en la temporada de término de lluvias en la misma localidad (Isla Sacrificios).

En cuanto a los niveles encontrados por grupo arrecifal, los sedimentos en el GN resultaron tener una mayor concentración de Pb con respecto al GS en ambas campañas de muestreo para la mayoría de los arrecifes, esto puede ser debido a que el GN se ubica frente al Puerto de Veracruz, en el cual se desarrollan actividades portuarias e industriales, además de tomar en cuenta el gran desarrollo urbano que ha experimentado durante los últimos años la

ciudad, esto tiende a generar una gran cantidad de desechos sólidos, aguas residuales y emisiones hacia la atmósfera que contribuyen a incrementar los niveles ambientales de Pb (Horta-Puga 2007). Sin embargo, no se encontraron diferencias significativas entre ambos grupos arrecifales, por lo cual no se puede concluir categóricamente que las concentraciones ambientales de Pb sean más altas en el GN (Mann-Whitney:  $U= 75$ ,  $p= 0.3421$ ) con respecto al GS.

**Tabla 5**  
**Concentración de Pb en sedimentos superficiales en el SAV y otras regiones del mundo (µg/g peso seco).**

<b>Autor</b>	<b>Concentración</b>	<b>Rango</b>	<b>Localidad</b>
<i>Otras regiones del mundo</i>			
Guzmán y Jiménez (1992)	28.8±8.0	20.8–36.8	Costa Rica
Guzmán y Jiménez (1992)	31.6±13.7	17.9–45.3	Panamá
Cuong y Obbard (2006)	26.1 ± 2.7		Kranji Singapur
Morillo et al. (2004)	69.9		Suroeste costa de España
Yuan et al. (2004)	33±11.0	22-44	Este del mar de China
Abu-Hilal (1993)	137.3±44.8	96.3-183	Jordán Golfo de Aqaba
Abaychi y Douabul (1986)	10±6.0	5.6-25.6	Golfo de Pérsico
Lu et al. (2005)	25±4	22.3	Bahía de San Francisco
Esslemount (2000)	100.15±29.85	70.3–130	Gran Barrera de arrecifes
<i>México</i>			
Soto-Jiménez y Páez-Osuna (2001)	82.7±45.3	37.4-128	Mazatlán Golfo de California
García et al. (2004)	46.5±9.6		Guaymas, Sonora
Ponce y Botello (1992)	33.9		Laguna de Términos Campeche
González et al. 1995	18.55±14.9	3.6-33.5	Laguna Sontecomapan Ver.
Rosales-Hoz et al. (2007)	26.1 ± 2.7	5.3–42.4	Isla Sacrificios SAV
<b>Este estudio</b>	<b>80.4±13.2</b>	<b>53.2-107.3</b>	<b>SAV</b>

En cuanto a los valores encontrados por sitio de muestreo, el arrecife Isla Sacrificios (98.2 y 107.3 µg/g) presentó los niveles más altos y Punta Gorda los más bajos (55.9 y 53.2 µg/g) para ambos muestreos, la cercanía a la costa de Isla Sacrificios posiblemente hace que sea vulnerable debido a los vertidos costeros y las descargas fluviales, así como por las

---

---

actividades portuarias que se sitúan muy cerca de la isla (Rosales-Hoz 2009). Por otro lado, en el GS en el arrecife La Blanca se presentaron los valores más bajos (67.6  $\mu\text{g/g}$ ) y el más alto (100.9  $\mu\text{g/g}$ ) en la M1 y la M2 respectivamente. Esta alta variabilidad puede ser explicada por el hecho de que al final de la temporada de lluvias, se acarrearán mayor cantidad de sedimentos finos, que se depositan en la proximidad de la desembocadura, lo que contribuye a aumentar los niveles de Pb en sedimentos.

Existen pocos estudios acerca de la contaminación por Pb en el SAV. Horta-Puga et al. (1996) reportaron niveles de plomo que oscilaban entre 45.33 y 107.85  $\mu\text{g/g}$  con un promedio general de 62.49  $\mu\text{g/g}$  en el esqueleto del coral *Montrastea annularis* en el arrecife Isla Verde, considerando a esta zona como altamente contaminada. Estos valores coinciden en gran medida con los encontrados en el presente trabajo. De la misma manera, Rosales-Hoz et al. (2007) encontraron concentraciones de 10.9  $\mu\text{g/g}$  en el arrecife Isla Sacrificios. Las concentraciones halladas en el SAV superan las de otros trabajos realizados en Veracruz (Botello y Páez-Osuna 1984, Álvarez et al. 1986, Villanueva y Botello 1992, González et al. 1995) y otros estados colindantes (Villanueva y Botello 1998, Ponce y Botello 1992, Vázquez y Sharma 2004).

Aunque aun no existe una norma que establezca los límites máximos permisibles (LMP) para la concentración de Pb en sedimentos y específicamente de origen biogénico, en México se tienen dos normas oficiales mexicanas (NOM) que estipulan los LMP de Pb. La NOM-052-SEMARNAT-2005 que establece los LMP de los residuos peligrosos que

---

---

pueden representar un riesgo para el equilibrio ecológico, el ambiente y la salud de la población en general considerando un límite de 5.0  $\mu\text{g/g}$ ; y la NOM-001-SEMARNAT-1996 que establece los LMP de contaminantes en la descargas de aguas residuales en aguas costeras teniendo como máximo 0.4-0.5  $\mu\text{g/g}$ . Estos límites son un punto de referencia sobre lo que se considera contaminado. Tomando en cuenta la primer norma y la fracción intercambiable como referencia, debido a que los metales asociados a esta fracción pueden ser incorporados por los organismos, durante la alimentación, los niveles aquí registrado no representan una amenaza para la biota arrecifal (Kersten y Förstner 1991), ya que en ninguno de los casos las concentraciones de este estudio rebasan los valores de la norma.

En orden para examinar el potencial impacto del Pb en la biota, se aplicó un procedimiento de extracción secuencial a los sedimentos. La composición geoquímica de los sedimentos superficiales por lo que se refiere a la concentración de este metal en cada fracción sedimentaria en orden decreciente fue:

**Carbonatos >Residual>Intercambiable >Materia Orgánica**

El alto porcentaje de este metal en la fracción asociada a carbonatos se ha observado en algunos otros estudios (Abaychi y Douabul 1986, Ponce et al. 1992). Abaychi y Douabul (1986) encontraron que el Pb asociado a la fracción de carbonatos fue predominante en el Golfo Árabe (42.5%), atribuyendo esto a los sedimentos ricos en carbonatos (>50%) presentes en la región. Este patrón se presentó en la mayoría de los arrecifes, excepto para Punta Gorda en ambos muestreos en donde la concentración más alta fue en la fracción

---

---

residual. Los resultados denotan que las concentraciones de Pb se encontraron en magnitudes menores en el arrecife Punta Gorda ( $30.2 \mu\text{g/g}$ ) y Hornos ( $27.7 \mu\text{g/g}$ ), en donde prácticamente la cobertura de corales es nula y los sedimentos son principalmente de origen terrígeno (Vargas-Hernández et al. 1993, Salas-Pérez y Granados-Barba 2008). Esto probablemente indica que el Pb tiene una gran afinidad con el  $\text{CaCO}_3$  y puede atribuirse a que se ha demostrado que el esqueleto de los corales (componente principal de los sedimentos) puede incorporar y acumular altas concentraciones de Pb dentro de sus estructuras calcáreas de aragonita (Shen y Boyle 1988, Linn et al. 1990).

La proporción porcentual del Pb en las diferentes fracciones geoquímicas se muestra en la Figura 3. Las F3 ( $71.8 \pm 3.7\%$ ) y F4 ( $21.1 \pm 2.4\%$ ) contribuyeron con un alto porcentaje del contenido total de Pb en los sedimentos, el resto fue distribuido en la F1 ( $4.7 \pm 0.3\%$ ) y la F2 ( $2.3 \pm 0.4\%$ ). Aunque teóricamente las F1 y F2 son reconocidas como los mayores reservorios para los metales biológicamente disponibles y bajo condiciones favorables la cantidad de metal asociado a estas fracciones pueden constituir un peligro para la biota (Kerstner y Förstner 1991), las concentraciones más bajas se encontraron en estas fracciones. La F3 y F4 presentaron las concentraciones más elevadas, no obstante la F4 contienen silicatos y otros minerales que retiene a los metales en su estructura cristalina, estos elementos no pueden ser liberados en el medio ambiente en condiciones naturales (Förstner 1979). Sin embargo, aunque las altas concentraciones de la F3 no representan una amenaza directa para el SAV, su importancia toxicológica radica en que su biodisponibilidad es favorecida por el pH ácido del sistema digestivo en los organismos

marinos (García et al. 2004). El carbonato de calcio podría ser un factor muy importante para la acumulación de Pb en el SAV, debido a que en muchos otros trabajos se ha visto que este metal principalmente se asocia a la fracción residual (Soto-Jiménez y Páez-Osuna 2001, Yuan et al. 2004, Morillo et al. 2004, Coung y Obbard 2006, Sánchez-García 2010).

#### *4.1 Conclusiones*

Las concentraciones de Pb son más altas al final de la temporada de lluvias, posiblemente debido a la influencia de la descarga del río Jamapa.

Los niveles de Pb son mayores en el GN, probablemente a la gran influencia que tiene este grupo por la cercanía con el Puerto de Veracruz.

Las altas concentraciones de Pb en la fracción geoquímica asociada a carbonatos posiblemente sean atribuidas a la afinidad que tiene este metal con la molécula de  $\text{CaCO}_3$ .

Los valores encontrados en el SAV de Pb no representan un riesgo paulatino para el ecosistema debido a que las F1 y F2 (biodisponibles) no rebasaron los niveles establecidos en las normas oficiales y aunque la F3 y F4 presentaron concentraciones altas, no son disponibles para los organismos.

## 5.- LITERATURA CITADA

Abayachy, J.K. y A.A.Z. Douabul. 1986. Trace elements geochemical Association in the Arabian Gulf. *Marine Pollution Bulletin*. 17:353-356.

Abu-Hilal, A. 1993. Observations on heavy metal geochemical association in marine sediments of the Jordan Gulf of Aqaba. *Mar. Poll. Bull.* 26(2):85-90.

Abd El-Azim, H. y M. Kh. El-Moselhy. 2005. Determination and partitioning of metals in sediments along the Suez Canal by sequential extraction. *Journal of Marine Systems* 56:363–374.

Acosta, G. G. 2002. Metales pesados en un sistema bentónico de dos arrecifes de coral de Veracruz, Ver. Tesis de licenciatura en Biología. FES-Iztacala. UNAM. 56 p.

Adriano, D.C. 2001. *Trace Elements in the Terrestrial Environment*. Springer, New York, segunda ed. 533 p.

Álvarez, R., H. L. Rosales y E. A. Carranza. 1986. Heavy metals in Blanco River sediments, Veracruz, México. *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología* 13:1-10.

Botello, A. V. y F. Páez-Osuna. 1984. Evaluación Geoquímica del Río Coatzacoalcos y áreas adyacentes. 1982-1983. Informe final presentado al Centro de Ecodesarrollo, ICML, UNAM, México, D.F.

Botello, A. V., J. L. Rojas, J. A. Benítez y D. Zárate. 1996. Golfo de México, contaminación e impacto ambiental: Diagnostico y tendencias. EPOMEX Serie Científica 5. Universidad Autónoma de Campeche, 666 p.

Bryan, G. W. y W.J. Langston. 1992. Bioavailability, accumulation and effects of heavy metals in sediments with special reference to United Kingdom estuaries: a review. *Environmental Pollution*. 76:89-131.

Carricart-Ganivet, J.P y G. Horta-Puga. 1993. Arrecifes de coral en México, 80-90 p. En: *Biodiversidad Marina y costera de México*. Salazar-Vallejo, S.I. y N.E. González. Com. Nal. Biodiversidad y CIQRO, México, 856 p.

Carriquiry, J.D. y G. Horta-Puga. 2010. The Ba/Ca record of corals from the Southern Gulf of Mexico: contributions from land-use changes, fluvial discharge and oil-drilling muds. *Mar. Poll. Bull.* 60:1625-1630.

Carrillo, L., G. Horta-Puga y J.P. Carricart-Ganivet (2007). Climate and Oceanography. En: *Coral reefs of southern Gulf of Mexico*. Tunnell J.W., Chávez E.A. and Whithers K. (Eds.). Texas A&M University Press, College Station, Tx. 34-40 p.

Chave, K.E. 1962. Factors influencing the mineralogy of carbonate sediments. *Limnology and Oceanographic*. 7:218-223.

Coung, D. y J. Obbard. 2006. Metal Speciation in coastal marine sediments from Singapore using a modified BCR-sequential extraction procedure. *Applied Geochemistry* 21:1335-1346.

Diario Oficial 1992. Decreto por el que se declara área natural protegida con el carácter de Parque Marino Nacional, la zona conocida como Sistema Arrecifal Veracruzano, ubicada frente a la Costas de los municipios de Veracruz, Boca del Río y Alvarado del estado de Veracruz Llave, con superficie de 52,238-91-50 hectáreas: *Diario Oficial de la Federación, México* (24 de Agosto de 1992): 6-15.

Esslemont, G. 2000. Heavy metals in seawater, marine sediments and corals from the Townsville section, Great Barrier Reef Marine Park, Queensland. *Marine Chemistry*. 71:215-231.

Ferre D' Amare, A.R. 1985. Coral reef of the mexican atlantic: a review, p.349-354. *Proc 5<sup>th</sup>. Coral reef Cong* Thaití.

Förstner, U. y G.T. Wittman. 1979. *Metal pollution in the aquatic environment*. Springer Verlag Germany.

García, R.L., C.M.S. Soto, M.E. Jara-Marini y A.A. Gómez. 2004. Fracciones geoquímicas de Cd, Cu, y Pb en sedimentos costeros superficiales de zonas ostrícolas del estado de Sonora, México. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 20(4):159-167.

González, F. 1995. Evaluación de Metales en Sedimentos Recientes y Organismos Bentónicos de la Laguna de Sontecomapan, Veracruz, Mexico. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México. 41 p.

Goyer, A.R. 1997. Toxic and essential metal interactions. *Annu. Rev. Nutr.* 17:37:50.

Guevara-Riba, A., A. Sahuquillo, R. Rubio y G. Rauret. 2004. Assessment of metal mobility in dredged harbour sediments from Barcelona, Spain. *Sci. Total Environ.* 321: 241–255.

Gulmini, M., G. Ostacoli y V. Zelano. 1994. Comparison between microwave and conventional heating procedures in tessier's extractions of calcium, cooper, iron and manganese in lagoon sediment. *Analyst.* 119:2075-2080.

Guzmán, H.M. y C.E. Jiménez. 1992. Contamination of coral reefs by heavy metals along the Caribbean coast of Central America (Costa Rica and Panama). *Mar. Pollut. Bull.* 24(11):554–61.

Hänsch, R. y R.R. Mendel. 2009. Physiological functions of mineral micronutrients (Cu, Zn, Mn, Fe, Ni, Mo, B, Cl). *Current Opinion in Plant Biology.* 12:259-266.

Heilprin, A. 1890. The Corals and coral reefs of the western wasters of the Gulf of Mexico. *Proc. Acad. Nat. Sci. Phil.* 42:303-316.



- 
- 
- Horta-Puga, G. y R. Rámirez-Palacios. 1996. Niveles de plomo en esqueleto del coral Arrecifal *Montrastea annularis*. 363-367 p. En: *Golfo de México, contaminación e impacto ambiental: Diagnostico y tendencias*. Botello, A. V., J. L. Rojas, J. A. Benítez y D. Zárate (Eds). Universidad Autónoma de Campeche. EPOMEX Serie Científica 5. 666 p.
- Horta-Puga, G. 2003. Condition of selected reef sites in the Veracruz Reef System (stony corals and algae). *Atoll Res. Bull.* 496, 360-369.
- Horta-Puga, G. 2007. Environmental Impacts. En: *Coral reefs of southern Gulf of Mexico*. Tunnell J.W., E.A. Chávez y K. Whithers (Eds). Texas A&M University Press, College Station, Tx. 126-141 p.
- Irukayama, K. 1967. The pollution of Minamata Bay and Minamata disease. En: *Advances in water pollution research*. Maroto J.P. y F. Josa (Eds). Proc. Third Int. Conf., Munich. 153-180 p.
- Jara-Marini, M.E., M.F. Soto-Jiménez y F. Páez-Osuna. 2008. Bulk and Bioavailable Heavy Metals (Cd, Cu, Pb, and Zn) in Surface Sediments from Mazatlán Harbor (SE Gulf of California). *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 80:150-153.
- Kersten, M. y U. Förstner. 1991. Speciation of trace elements in sediments. En: *Trace elements Speciation: Analytical methods and problems*. Batley G.E. (ed), CRC Press, Boca Raton. 245-317 p.
- Kobayashi, J. 1978. Pollution by cadmium and the *itai-itai* disease in Japan. En: *Toxicity of Heavy Metals in the Environment*. Oehme F.W. Ed. Marcel Dekker, Inc., New York. 199-260.
- Laws, E.A. 2000. *Aquatic Pollution*. John Wiley y Sons. Tercera ed. New York, USA.
- Libes, M. S. 2009. *Introduction to marine biogeochemistry*. Academic Press. Segunda ed. 909 p.
- Linn, L.J., M.L. Delaney y R.M. Druffel. 1990. Trace metals in contemporary and seventeenth-century Galapagos coral: records of seasonal and annual variations. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 54:387-394.
- Loring, D.H. y R.T.T. Rantala. 1992. Manual for the geochemical analyses of marine sediments and suspended particulate matter. *Earth Science Reviews* 32:235-283.
- Lu X.Q., I. Werner y T.M. Young. 2005. Geochemistry and bioavailability of metals and sediments from northern San Francisco bay, *Environment International*. 31(4):593-602.
- Luoma, S.N. 1989. Can we determine the biological availability of sediment-bound trace elements? *Hydrobiologia*. 176/177:379-396.
- Macias-Zamora, J.V., J.A. Villaescusa-Celaya, A. Muños-Barbosa y G. Gold-Bouchot. 1999. Trace metals in sediments cores from the Campeche shelf, Gulf of México. *Environmental Pollution*. 104:69-77.
- Mance, G. 1987. Pollution threat of heavy metals in aquatic environments. Elsevier Applied Science Publishers LTD. New York. 372 p.

- 
- 
- Mandelli, E.F. 1979. Contaminación por metales pesados. Rev. Com. Perm. Pacífico Sur. 10:209-228.
- Mester, Z., C. Creminini, E. Ghiara y R. Morabito. 1998. Comparison of two sequential extraction procedures for metal fractionation in sediment samples. Anal. Chim. Acta 359, 133-142.
- Morlán-Cahue, Y., y H. Opengo-Piña, 2005. Determinación de metales (Fe, Mn, Pb y Zn) en macroalgas clorofitas del Sistema Arrecifal Veracruzano, México, p. 373-388. En: *Contaminación e impacto ambiental. Diagnostico y Tendencias*. Botello A.V., J.L. Rojas-Galaviz, J.A. Benitez, D. Zarate-Lomeli. (eds) Golfo de México, EPOMEX Serie Científica, 5. Universidad Autónoma de Campeche. México. 666 p.
- Morillo, J., J. Usero y I. Gracia. 2004. Heavy metal distribution in marine sediments from the southwest coast of Spain. Chemosphere 55:431-442.
- Nriagu, J.O. 1979. Global inventory of natural and anthropogenic emissions of trace metals to the atmosphere. Nature. 279:409-411.
- Nriagu, J.O. y J.M. Pacyna. 1988. Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils by trace metals. Nature. 333:134-139.
- Noriega, E.E. 2001. Metales pesados en *Thalassia testudinum* (pasto marino), en el Sistema Arrecifal Veracruzano. Tesis de licenciatura en Biología. ENEP-Iztacala. UNAM. 48 p.
- Páez-Osuna, F., A.V. Botello y S.F. Villanueva. 1986. Heavy metals in Coatzacoalcos Estuary and Ostion Lagoon, Mexico. Marine Pollution Bulletin 11:516-519.
- Páez-Osuna, F. y J.I. Osuna-López. 1990. Distribución del Zn en las diferentes fracciones químicas de los sedimentos superficiales del bajo Golfo de California. Ciencias Marinas. 16(2):87-95.
- Ponce, V.G. y V. A. Botello. 1992. Aspectos geoquímicos y de contaminación por metales pesados en la laguna Términos, Campeche. Hidrobiológica. México 1(2):1-10.
- Rivera, R.F. 2006. Determinación de metales traza (Cu, Ni, Pb, V y Fe) en agua de mar y en dos especies de corales en el arrecife Sacrificios del Sistema Arrecifal Veracruzano (SAV). Tesis de maestría en ciencias. Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología. Universidad Nacional Autónoma de México. 105 p.
- Rosales, L., A. Carranza y R. U. Álvarez. 1986. Sedimentological and chemical studies in sediments from Alvarado lagoon system, Veracruz, Mexico. Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM. 13(3):19-28.
- Rosales-Hoz, L., A.B. Cundy y J.L. Bahena-Manjarrez. 2003. Heavy metals in sediments cores from a tropical estuary affected by anthropogenic discharges: Coatzacoalcos estuary, México. Estuarine, Coastal and Shelf Science. 58:117-126.

- 
- 
- Rosales-Hoz, L., A. Carranza-Edwards y O. Celis-Hernández. 2007. Environmental implications of heavy metals in surface sediments near Isla de Sacrificios, Mexico. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 78:353-357.
- Rosales-Hoz, L., A. Carranza-Edward, L. Sanvicente-Añorve, M.A. Alatorre-Mendieta y F. Rivera-Ramírez. 2009. Distribution of dissolved trace metals around the Sacrificios Coral Reef Island, in the Southwestern Gulf of México. *Bull Environ. Contam. Toxicol.* 83:713-719.
- Salas-Pérez, J. y A. Granados-Barba. 2008. Oceanographic characterization of the Veracruz reefs system. *Atmósfera* 21(3):281-301.
- Sánchez-García, L., J. Ramón de Andrés y J.A. Martín-Rubí. 2010. Geochemical signature in off-shore sediments from the Gul of Cádiz inner shelf sources and spatial variability of major and trace elements. *Journal of Marine Systems.* 80:191-202.
- Sánchez, P.L. 1994. Determinación de metales pesados en el coral pétreo *Madracis decactis* en el arrecife de Isla Verde en Veracruz. Tesis de licenciatura en Biología. ENEP-Iztacala. UNAM. 62 p.
- Shen, G.T. y E.A. Boyle. 1988. Determination of lead, cadmium, and other trace metals in annually-banded corals, *Chem. Geol.* 67:47-62.
- Soto-Jiménez, M. y F. Páez-Osuna. 2001. Cd, Cu, Pb, and Zn in Lagoonal Sediments from Mazatlán Harbor (SE Gulf of California): Bioavailability and Geochemical Fractioning. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 66:350-356.
- Tessier, A., P.G. Campbell y N. Bisson. 1979. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Analyt. Chemistry.* 51:844-850.
- Tovar, J.E. 2000. Evaluación de metales pesados en dos sistemas bentónicos arrecifales de Veracruz, Ver. Tesis de licenciatura en Biología. ENEP-Iztacala. UNAM. 68 p.
- Tunell, J.W. 1992. Natural versus human impacts to Southern Gulf of México coral reef resources. *Proceedings of the Seventh Internacional Coral Reef Symposium, Guam,* 1:300-306.
- Tunnell, J.W. 2007. Reef Distribtion. En: Tunnell, J.W., E.A. Chávez y K. Withers. 2007. *Coral reefs of the southern Gulf of México.* Texas A&M University Press.
- Usero, J., M. Gamero, J. Morillo, I. Gracia. 1998. Comparative study of three sequential extraction procedures for metals in marine sediments. *Environment International.* 24(4):487-496.
- Vargas-Hernández, J. M., A. Hernández-Gutiérrez y L. F. Carrera. 1993. Sistema Arrecifal Veracruzano. 559-575 p. En: *Biodiversidad Marina y Costera de México.* Salazar S. I., N. E. González. Com. Nal. Biodiversidad y CIQRO. México, 865 p.
- Vázquez, F., V. K. Sharma, Q. A. Mendoza y R. Hernández. 2001. Metals in fish and shrimp of the Campeche Sound, Gulf of Mexico. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 46:774-781.

---

---

Vázquez, G.F. y V.K. Sharma. 2004. Major and trace elements in sediments of the Campeche Sound, southeast Gulf of México. *Marine Pollution Bulletin*. 48:87-90.

Vázquez-Botello, A., S. Villanueva-Fragoso y L. Rosales-Hoz. 2004. Distribución y contaminación de metales en el Golfo de México. En: *Diagnostico ambiental del Golfo de México*. Caso M., I. Pisanty y E. Escurra, (Eds.) INE-SEMARNAT. México. 425-447.

Vázquez-Sauceda, M.L., G. Aguirre-Guzmán, R. Pérez-Castañeda, J. Rábago-Castro y J.G. Sánchez. 2005. Contenido de cadmio y plomo en agua, ostión y sedimento de la laguna de San Andrés, Aldama, Tamaulipas. *Ciencia y Mar*. 27:3-9.

Viarengo, A. 1985. Biochemical effects of trace metals. *Marine Pollution Bulletin*. 16(4):153-158.

Villanueva, S.F. y A.V. Botello. 1992. Metales pesados en la zona costera del Golfo de México y Caribe mexicano: Una revisión. *Rev. Int. Contam. Ambient. México*. 8(1):47-61.

Villanueva, F.S. y F. Páez-Osuna. 1996. Niveles de metales en el Golfo de México: Agua, sedimento y organismos, p.309-347. En: *Contaminación e impacto ambiental. Diagnostico y Tendencias*. Botello A.V., J.L. Rojas-Galaviz, J.A. Benitez, D. Zarate-Lomeli. (eds) Golfo de México, EPOMEX Serie Científica, 5. Universidad Autónoma de Campeche. México. 666 p.

Villanueva, S.F. y A.V. Botello. 1998. Metal Pollution in Coastal Areas of México. *Rev. Environmental Contamination and Toxicology*. México. 157:53-94.

Yuan, C., J. Shi, B. He, J. Liu, L. Liang y G. Jiang. 2004. Speciation of heavy metals in marine sediments from the East China Sea by ICP-MS with sequential extraction. *Environ. Int.* 30:769-783.

(INEGI: <http://www.inegi.gob.mx>).