



---

# Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

ÁREA ACADÉMICA DE BIOLOGÍA

DOCTORADO EN CIENCIAS EN BIODIVERSIDAD Y CONSERVACIÓN

Determinación de algunos metales pesados en *Eugerres plumieri* (Cuvier, 1830)  
y agua de Laguna de Tampamachoco, Veracruz por  
espectroscopía de absorción atómica

*TESIS*

*QUE PARA OBTENER EL GRADO DE*

DOCTOR EN CIENCIAS  
EN BIODIVERSIDAD Y CONSERVACIÓN

PRESENTA:

Marisela López Ortega

Director de tesis: Dra. Griselda Pulido Flores  
Codirector: Dr. Arturo Serrano Solís

MINERAL DE LA REFORMA, HIDALGO

2012



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO  
INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA  
ÁREA ACADÉMICA DE BIOLOGÍA  
DOCTORADO EN CIENCIAS EN BIODIVERSIDAD Y CONSERVACIÓN

M. EN A. JULIO CESAR LEINES MEDÉCIGO  
DIRECTOR DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR  
P R E S E N T E

Por este conducto le comunico que, después de revisar el trabajo titulado “**Determinación de algunos metales pesados en *Eugerres plumieri* (Cuvier, 1830) y agua de la Laguna de Tampamachoco, Veracruz por espectroscopía de absorción atómica**”, que presenta la alumna del Doctorado en Ciencias en Biodiversidad y Conservación, **M. en C. Marisela López Ortega**, el Comité Revisor de tesis ha decidido autorizar la impresión del mismo, hechas las correcciones que fueron acordadas.

A continuación se anotan las firmas de conformidad de los integrantes del Comité Revisor.

PRESIDENTE: Dr. William Scott Monks Sheets

SECRETARIO: Dr. Arturo Serrano Solís

VOCAL: Dra. Griselda Pulido Flores

SUPLENTE: Dr. Juan Carlos Gaytán Oyarzún

Sin otro particular, reitero a Usted la seguridad de mi atenta consideración.

**ATENTAMENTE,**  
"AMOR, ORDEN Y PROGRESO"  
Mineral de la Reforma, Hgo., a 22 de marzo del 2012.

DR. ORLANDO AVILA POZOS  
Director I.C.B.I.

## AGRADECIMIENTOS

A CONACYT- por haber otorgado la beca No. 217713 para realizar estudios de de posgrado.

A la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH) por permitirme desarrollar y llevar a cabo mis estudios de posgrado, así mismo por el apoyo brindado para la asistencia a un evento académico.

A la Universidad Veracruzana (UV) por todas las facilidades otorgadas para la realización del posgrado y en su infraestructura para la realización de este trabajo de investigación.

Al M.C. Domingo Canales Espinosa, Director General del Área Biológico Agropecuaria de la Universidad Veracruzana por las facilidades otorgadas para la realización de este posgrado.

A Dr. Pablo Elorza Martínez, Director de la Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias- Campus Tuxpan, por todas las facilidades brindadas para desarrollar el posgrado.

A mi directora de Tesis Dra. Griselda Pulido Flores, co-director Arturo Serrano Solís y comité tutorial: Dr. William Scott y Dr. Juan Carlos Gaytán Oyarzún, que con su experiencia, observaciones, consejos y paciencia durante el desarrollo de este trabajo fue posible llevarlo a buen término.

A todas las personas que de una manera u otra me dieron apoyo durante el proceso del presente trabajo.

*A mi familia*

## INDICE

### RESUMEN

### ABSTRACT

I.	INTRODUCCIÓN	1
II.	MARCO TEORICO	2
	II.1 Laguna de Tampamachoco, Veracruz	2
	II.1.1 Hidrología	2
	II.1.2 Climatología	4
	II.1.3 Batimetría	4
	II.1.4. Características fisicoquímicas del agua	4
	II.1.5 Flora y fauna	5
	II.1.6 Usos del agua y suelo	6
	II.1.7 Población	6
	II.1.8 Información social y socioeconómica	7
	II.1.9 Importancia biológica	7
III.	CONTAMINACION ACUATICA	7
	III.1 Problemática ambiental en sistemas acuáticos	8
IV.	METALES PESADOS	10
	IV.1 Definición	10
	IV.2 Origen de los metales pesados	10
	IV.3 Propiedades físicas y químicas de los metales pesados	10
	IV.4 Fuentes de metales pesados en el medio ambiente	11
	IV.5 Metales pesados en agua y sedimentos	13
	IV.6 Metales pesados en animales	14
	IV.7 Impacto de los metales pesados en la salud humana	17
	IV.8 Efecto de los metales pesados en la biota	19
	IV.9 Cinética de los metales pesados	22
	IV.10 Legislación sobre niveles de metales pesados	24

V.	ANTECEDENTES	25
VI.	JUSTIFICACIÓN	31
VII.	OBJETIVOS	32
	VII.1 Objetivo general	32
	VII.2 Objetivos particulares	32
VIII.	METODOLOGÍA	33
	VIII.1 Área de estudio	33
	VIII.2 Sitios de muestreo	33
	VIII.3 Periodo de muestreo	34
	VIII.4 Muestreo de agua	34
	VIII.5 Muestreo de peces	34
	VIII.6 Medición de variables fisicoquímicas	35
	VIII.7 Análisis de metales pesados (Pb, Cr, Cd, Cu, Ba y Hg)	35
	VIII.8 Análisis estadístico	37
IX.	RESULTADOS	38
	IX.1 Caracterización fisicoquímica de la laguna de Tampamachoco, Veracruz.	38
	IX.1.1 Parámetros físico-químicos	38
	IX.1.1.1 Temperatura del agua	39
	IX.1.1.2 Potencial de Hidrógeno (pH)	40
	IX.1.1.3 Oxígeno disuelto	41
	IX.1.1.4 Porcentaje de saturación de oxígeno disuelto	42
	IX.1.1.5 Salinidad	43
	IX.1.1.6 Conductividad eléctrica	44
	IX.1.1.7 Sólidos totales disueltos	45
	IX.1.1.8 Transparencia	46
	IX.2 Metales pesados	47
	IX.2.1 Metales pesados en agua	47
	IX.2.1.1 Cromo	48
	IX.2.1.2 Cobre	49
	IX.2.1.3 Bario	50

IX.2.2	Metales pesados en <i>Eugerres plumieri</i>	51
IX.2.2.1	Plomo	52
IX.2.2.2	Cromo	53
IX.2.2.3	Cadmio	54
IX.2.2.4	Cobre	55
IX.2.2.5	Bario	56
IX.2.3	Análisis de componentes principales	57
X.	DISCUSIÓN	69
XI.	CONCLUSIONES	74
XII.	RECOMENDACIONES	77
XIII.	BIBLIOGRAFIA	78

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1	Localización del área de estudio (20° 58' a 21° 05' latitud Norte y 97° 20' a 97° 24' de longitud Oeste).	3
Figura 2	<i>Eugerres plumieri</i> (Cuvier, 1830) de la laguna de Tampamachoco, Veracruz	30
Figura 3	Fluctuación mensual de Temperatura del agua (°C) en cuatro sitios de la laguna de Tampamachoco, Veracruz de Enero 2009 a Febrero 2010.	39
Figura 4	Fluctuación mensual de pH en cuatro sitios de la laguna de Tampamachoco, Veracruz	40
Figura 5	Fluctuación mensual de oxígeno disuelto (mg/L) en cuatro sitios en la laguna de Tampamachoco, Veracruz	41
Figura 6	Fluctuación mensual de porcentaje de saturación de oxígeno disuelto en cuatro sitios en la laguna de Tampamachoco, Veracruz	42
Figura 7	Fluctuación mensual de salinidad (ups) en cuatro sitios en la laguna de Tampamachoco, Veracruz	43
Figura 8	Fluctuación mensual de conductividad eléctrica (mS/cm) en cuatro sitios en la laguna de Tampamachoco, Veracruz	44
Figura 9	Fluctuación mensual de sólidos disueltos totales (ppt) en cuatro sitios en la laguna de Tampamachoco, Veracruz	45
Figura 10	Fluctuación mensual de transparencia (cm) en cuatro sitios en la laguna de Tampamachoco, Veracruz	46

Figura 11	Concentración promedio anual (Enero 2009-Febrero 2010) de Cr (mg/L) en agua de la Laguna de Tampamachoco, Veracruz.	48
Figura 12	Concentración promedio anual (Enero 2009-Febrero 2010) de Cu (mg/L) en agua de la Laguna de Tampamachoco, Veracruz.	49
Figura 13	Concentración promedio anual (Enero 2009-Febrero 2010) de Ba (mg/L) en agua de la Laguna de Tampamachoco, Veracruz.	50
Figura 14	Concentración mensual (Enero 2009-Febrero 2010) de Pb en tejidos y órganos de <i>E. plumieri</i> de la Laguna de Tampamachoco, Veracruz.	52
Figura 15	Concentración promedio anual (Enero 2009-Febrero 2010) de Pb en tejidos y órganos de <i>E. plumieri</i> de la Laguna de Tampamachoco, Veracruz.	52
Figura 16	Concentración mensual (Enero 2009-Febrero 2010) de Cr en tejidos y órganos de <i>E. plumieri</i> de la Laguna de Tampamachoco, Veracruz.	53
Figura 17	Concentración promedio anual (Enero 2009-Febrero 2010) de Cr en tejidos y órganos de <i>E. plumieri</i> de la Laguna de Tampamachoco, Veracruz.	53
Figura 18	Concentración mensual (Enero 2009 -Febrero 2010) de Cd en tejidos y órganos de <i>E. plumieri</i> de la Laguna de Tampamachoco, Veracruz.	54
Figura 19	Concentración promedio anual (Enero 2009-Febrero 2010) de Cd en tejidos y órganos de <i>E. plumieri</i> de la Laguna de Tampamachoco, Veracruz	54

Figura 20	Concentración mensual (Enero 2009-Febrero 2010) de Cu en tejidos y órganos de <i>E. plumieri</i> de la Laguna de Tampamachoco, Veracruz	55
Figura 21	Concentración promedio anual (Enero 2009-Febrero 2010) de Cu en tejidos y órganos de <i>E. plumieri</i> de la Laguna de Tampamachoco, Veracruz	55
Figura 22	Concentración mensual (Enero 2009-Febrero 2010) de Ba en tejidos y órganos de <i>E. plumieri</i> de la Laguna de Tampamachoco, Veracruz	56
Figura 23	Concentración promedio anual (Enero 2009-Febrero 2010) de Ba en tejidos y órganos de <i>E. plumieri</i> de la Laguna de Tampamachoco, Veracruz	56
Figura 24	Combinación de componentes principales en tejidos y órganos de <i>E. plumieri</i>	64
Figura 25	Combinación de componentes principales en agua	68

## INDICE DE CUADROS

Cuadro 1	Valores mínimo, máximo y promedio anual (Enero 2009-Febrero 2010) para los parámetros físico-químicos evaluadas de la laguna de Tampamachoco, Veracruz	38
Cuadro 2	Concentración mínima, máxima y promedio anual (Enero 1999-Febrero 2010) de metales pesados en agua de la laguna de Tampamachoco, Veracruz	47
Cuadro 3	Concentraciones mínima, máxima y promedio anual (Enero 1999 - Febrero 2010) (mg/kg Base Seca)de metales pesados en <i>E. plumieri</i> en la laguna de Tampamachoco, Veracruz	51
Cuadro 4	OTUS considerados en el análisis de tejidos de <i>E. plumieri</i>	59
Cuadro 5	OTUS considerados en el análisis de agua	61
Cuadro 6	Eigenvalores y proporción de la varianza acumulada en los tres primeros componentes principales en tejidos.	63
Cuadro 7	Coefficiente de cada variable en los primeros tres componentes principales de la matriz básica de datos de tejidos con 56 OTUS y 7 variables	65
Cuadro 8	Eigenvalores y proporción de la varianza acumulada en los tres primeros componentes principales en agua.	66
Cuadro 9	Coefficiente de cada variable en los primeros tres componentes principales de la matriz básica de datos de agua con 56 OTUS y 11 variables	67

## RESUMEN

Entre los contaminantes más dañinos para la biota acuática, se encuentran los metales pesados, que en los ecosistemas costeros los organismos pueden almacenarlos (bioacumulación) y conducir a un aumento de su concentración al pasar de un nivel trófico a niveles tróficos superiores (biomagnificación) afectando a sus poblaciones e indirectamente al ser humano, por lo cual, el propósito de esta investigación fue analizar la concentración de seis metales pesados (Pb, Cr, Cd, Cu, Ba y Hg) de interés toxicológico en agua y en tejidos y órganos de *Eugerres plumieri* (mojarra) de la Laguna de Tampamachoco, Veracruz, que se ubica en la zona costera del estado.

El estudio se realizó mensualmente (Enero 2009 a Febrero 2010) en cuatro sitios de muestreo: La Mata, Isla Potreros, CFE y Pipiloya. El análisis de los metales pesados se realizó con un espectrofotómetro de absorción atómica. Se registró un comportamiento fisicoquímico estacional, en primavera-verano se observaron los mayores valores de temperatura, salinidad, conductividad eléctrica y los menores valores oxígeno disuelto y saturación de oxígeno, en invierno se registraron los mayores valores de pH, oxígeno disuelto, saturación de oxígeno, sólidos totales disueltos y transparencia y los menores valores de temperatura, en otoño los menores valores de pH, salinidad y sólidos totales disueltos. La temperatura, salinidad, oxígeno disuelto y pH, influyeron en la disponibilidad de los metales pesados.

En los cuatro sitios se detectaron Cr, Cu y Ba en agua, que superan los límites máximos permitidos por los CECA (SEDUE, 1989). En los tejidos y órganos, el Pb y Cd superan el límite máximo permitido por la NOM-242-SSA-1-2009, el Cr por la Oficina Central de Gobierno de Hong Kong, el Ba por los CECA (1989) y el Cu está por debajo de lo recomendado por la FAO (1983). El hígado y branquia registraron las mayores concentraciones y el músculo las menores. Los metales analizados en este trabajo, con excepción del Cu, no son esenciales para las plantas, animales e incluso seres humanos, por lo tanto su presencia en los tejidos de *E. plumieri* y agua aunado a que rebasan los límites máximos permitidos por la normatividad, indican que la Laguna de Tampamachoco, Veracruz presenta contaminación por estos metales pesados.

Palabras clave: Laguna costera, contaminación, metales pesados, *Eugerres plumieri*, Laguna de Tampamachoco, Veracruz, Golfo de México.

## ABSTRACT

Within the most harmful pollutants to aquatic biota, there are heavy metals, organisms could store them (bioaccumulation) in coastal ecosystems, and increase their concentration going from low trophic level to higher levels (biomagnification), affecting their populations and indirectly to humans, therefore, the purpose of this research was to analyze the concentration of six heavy metals (Pb, Cr, Cd, Cu, Ba and Hg) of toxicological concern in water, tissues and organs of *Eugerres plumieri* (bream) of Laguna Tampamachoco, Veracruz, which is located in the coastal area of the state.

The study was conducted monthly (January 2009 to February 2010) in four sampling sites: La Mata, Isla Potreros, CFE and Pipiloja. The analysis of the heavy metals was carried out with an atomic absorption spectrophotometer. We found a seasonal physicochemical behavior, Spring-Summer had the highest values of temperature, salinity, electrical conductivity and the lowest dissolved oxygen and oxygen saturation, Winter showed the highest values of pH, dissolved oxygen, oxygen saturation, total dissolved solids and transparency and the lowest temperature. In autumn the lowest values of pH, salinity and total dissolved solids. The temperature, salinity, dissolved oxygen and pH, had influence in the availability of heavy metals.

At the four sites were detected Cr, Cu and Ba in water, in excess of maximum permitted by the CECA, (SEDUE, 1989). In tissues and organs, Pb and Cd exceed the maximum allowable limit in NOM-242-SSA-1-2009, Cr by the Central Bureau Government of Hong Kong, Ba by the CECA (1989) and Cu is below that recommended by FAO (1983). Liver and gill had the highest concentrations and muscle the lowest. The metals analyzed in this work, with the exception of Cu, are not essential for plants, animals and even humans, so their presence in the tissues of *E. plumieri* and water combined to exceed the maximum permitted by the regulations indicate that Tampamachoco Lagoon, Veracruz presents contamination by these heavy metals

Keywords: Coastal lagoon, pollution, heavy metals, *Eugerres plumieri*, Tampamachoco lagoon, Veracruz, Gulf of Mexico

## I. INTRODUCCIÓN

En México hay 124 lagunas costeras (Contreras, 1985) y conjuntamente con los esteros, alcanzan una superficie total de aproximadamente 567,300 hectáreas en las costas del Golfo de México y del Pacífico mexicano (Yáñez-Arancibia, 1977). La costa veracruzana mide 745.14 km, presentando una gran cantidad de lagunas costeras, de entre las que sobresalen Pueblo Viejo, Tamiahua, Tampamachoco, El Llano, La Mancha, Mandinga, Alvarado, Sontecomapan y El Ostión. La mayoría de las lagunas veracruzanas son salobres (Contreras, 1985).

La zona costera mexicana es de importancia económica porque es una fuente significativa de alimentos; entre las especies más comunes se encuentran: *Ariopsis felis* (bagre boca chica), *Cathrops melanopus* Günther, 1864 (bagre prieto), *Centropomus paralielus* Poey, 1860 (robalo), *Mugil curema* Valenciennes, 1836 (lebrancha), *Eucinostomus gula* Quoy y Gaimard, 1824, *Eugerres plumieri* Cuvier, 1830 y *Diapterus rhombeus* Cuvier, 1829 (mojarras), *Bairdiella chrysoura* Lacepède, 1802 (ronco) (Toledo, 2005).

Los cambios de uso del suelo, el aumento de la población y la migración hacia las costas, el uso no controlado de agroquímicos, los desechos de las industrias, el escaso tratamiento de las aguas negras de las poblaciones ribereñas y la tala inmoderada de cubiertas vegetales son las principales causas de la alteración y contaminación de las lagunas costeras. Con base en los datos que se tienen de las condiciones en que se encuentran las lagunas, se puede afirmar que todas están fuertemente impactadas por actividades humanas, que han provocado entre otras cosas, el descenso de la pesca en muchos sitios ya que tienen un impacto considerable en las comunidades de peces de las lagunas litorales y estuarios. Una de las ventajas de usar las comunidades de peces en los estudios de impacto medioambientales es debido a la alta movilidad de muchas especies (Cabral, 2001).

Este estudio tuvo como finalidad analizar la concentración de seis metales pesados (Pb, Cr, Cd, Cu, Ba y Hg) de interés toxicológico en agua y en tejidos y órganos de *Eugerres plumieri* (mojarra) de la Laguna de Tampamachoco, Veracruz para determinar su cinética ambiental, biodisponibilidad y toxicocinética.

## II. MARCO TEÓRICO

### II.1 Laguna de Tampamachoco, Veracruz

La laguna de Tampamachoco se localiza en la llanura costera norte del estado de Veracruz, a 9 km al noroeste de la ciudad de Tuxpan. Forma parte del complejo lagunar Tamiahua-Tampamachoco pertenecientes al Sitio Ramsar 1602, “Manglares y Humedales de Tuxpan”, Veracruz, México, el cual forma parte de la Región Terrestre Prioritaria (RTP-103) para la Conservación de México. Sin embargo, la laguna sufre importantes impactos ambientales directos e indirectos, relacionados principalmente, con la diversidad e intensidad de usos y actividades que se desarrollan en ella y su entorno. Se ubica entre los paralelos 20° 58' a 21° 05' de latitud Norte y los meridianos 97° 20' a 97° 24' de longitud Oeste. La laguna tiene forma alargada y corre paralela a la línea de costa, con una longitud de 10.6 km y ancho máximo de 2.7 km; ocupa un área de 1,500ha. Está separada del Golfo de México por una barrera arenosa denominada Barra Galindo, situada al norte de la laguna, con ancho máximo de 2.67 km y mínima de 1.3 km (Reguero *et al.*, 1991) (Figura 1).

#### II.1.1 Hidrología

En el norte, el sistema lagunar se comunica con la Laguna de Tamiahua mediante un canal de navegación natural llamado El Viejo y uno artificial de nombre El Nuevo; al noroeste se ubica la desembocadura del estero El Angosto y al sur la del Río Tuxpan a través del estero de Tampamachoco ubicado a 2 Km de la desembocadura en el mar, por lo que su comunicación con éste es casi directa. El río Tuxpan es el principal sistema fluvial de la zona y junto con otros pequeños arroyos de menor caudal, suministran la mayor cantidad de agua dulce durante el periodo de lluvias (Castro-Aguirre, 1986) (Figura1).

La laguna de Tampamachoco no tiene aporte de otros ríos, solamente cauces secundarios, principalmente recibe aportes de agua dulce en su porción septentrional por el estero El Corral, localizado al noroeste de la Barra de Galindo, que está en comunicación directa al Golfo de México, abierta artificialmente en 1979 (SEDAP, 1997) y vierte su contenido en los canales de

navegación El Viejo y El Nuevo; del noroeste provienen del estero El Angosto; en el cual existen escurrideros estacionales entre el rancho Oro Negro y Punta Potrero y frente al poblado de Tampamachoco, factores que influyen en su comportamiento fisicoquímico.

Esta laguna tiene una marcada influencia de la marea debido a que generan velocidades de flujo y reflujos en la boca hasta de 3.04 m/seg, por lo anterior es una laguna de características hidrológicas marinas con influencia de agua dulce proveniente del río Tuxpan (Contreras, 1985).

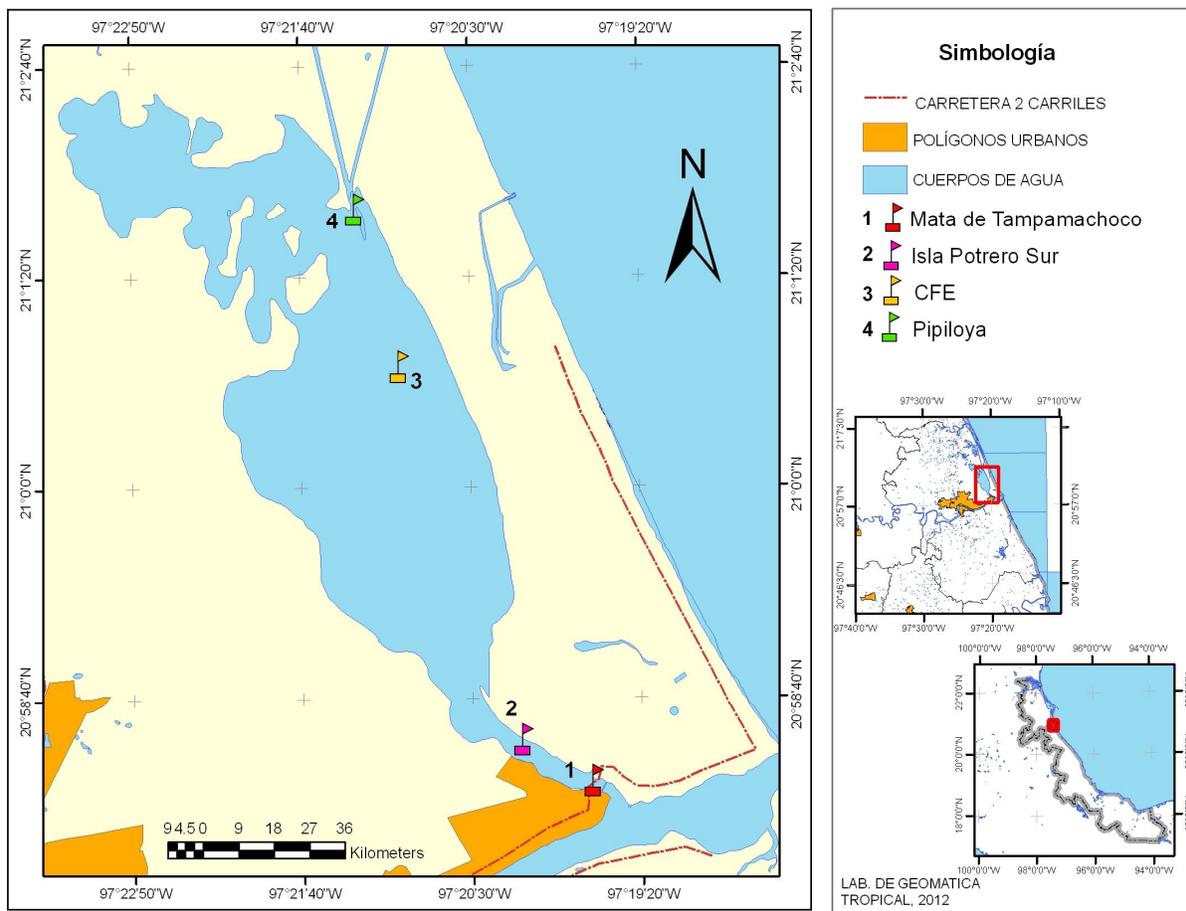


Figura 1. Localización del área de estudio (20° 58' a 21° 05' latitud Norte y 97° 20' a 97° 24' de longitud Oeste).

### II.1.2 Climatología

El clima de la región es del tipo Aw"z (e), de tipo cálido-subhúmedo con régimen de lluvias en el verano García (1971), con temperatura y precipitación pluvial medias anuales de 24.2°C y 1,350 mm respectivamente. La época de lluvias comprende los meses de junio a diciembre (verano y otoño); el mes más lluvioso es septiembre, con una precipitación media mensual de 349 mm (Departamento de Pesca, 1977).

Los vientos dominantes provienen del este; su velocidad máxima es de 48 km/h, desde parte de marzo hasta parcialmente en septiembre; los vientos secundarios proceden del norte y del noroeste, durante la parte complementaria de septiembre hasta el resto de marzo; alcanzan ocasionalmente velocidades hasta de 150 km/h. En el Golfo de México los denominan “nortes”; su frecuencia mayor es durante noviembre.

### II.1.3 Batimetría

La laguna es somera, con una profundidad promedio de un metro; en los canales de acceso se registran valores de más de 3 m. En el área la turbiedad es elevada, con transparencia media de 0.30 m. (Reguero *et al.*, 1991).

### II.1.4 Características físico-químicas del agua

La temperatura mínima se registra en febrero, con un valor de 18.3°C; la máxima se presenta en julio con 32.1°C, y la media es de 26.4°C. El valor máximo obtenido de salinidad es de 36.58 ups, en mayo; el mínimo es de 15.33 durante octubre, con una media de 30.21 ups (Contreras, 1983). El sustrato existente es principalmente de tipo fino, constituido por limos, arcillas y arenas.

## II.1.5 Flora y fauna

Se encuentran las cuatro especies de mangle reportadas para México, mismas que se reportan en la categoría de Protección Especial: Mangle rojo (*Rhizophora mangle*), mangle negro (*Avicennia germinans*), mangle blanco (*Laguncularia racemosa*) y mangle botoncillo (*Conocarpus erectus*). Éste último considerado en ocasiones como una especie diferente al mangle. A su vez con el manglar se encuentran asociadas especies que corresponden a la selva mediana subperennifolia como *Acacia cornigera*, *Bromelia pinguin*, *Bursera simaruba*, *Coccoloba barbadensis*, *Psidium guajava*, *Jacquinia macrocarpa*, *Viscum album*, *Solanum* sp., *Miconia argentea*, *Guazuma ulmifolia* y *Zamia* sp. (Basáñez, 2005).

La fauna en el manglar está compuesta por mamíferos de la familia Dasypodidae como *Dasybus novemicintus*, Didelphidae, con una especie, *Didelphis marsupialis*, Leporidae con *Sylvilagus* sp., Muridae, sólo con *Mus musculus* y Procyonidae con *Procyon lotor*.

Es importante mencionar la gran cantidad de organismos acuáticos que dependen de los fenómenos ecológicos que suceden en el manglar: moluscos gasterópodos y bivalvos, artrópodos, crustáceos y peces. Dentro de los primeros se presentan: *Neritina reclinata*, *Cerithidea plicolosa*, *Olivella minuta* y *Fosaria* sp.; los bivalvos son: *Ischadium recurvos*, *Chomytilus* sp. y *Crassostrea virginica*. Dentro del grupo de los crustáceos se registraron: *Penaeus setiferus*, *P. aztecus*, *Callinectes sapidus*, *Cardiosoma guanhumi*, *Goniopsis cruentata*, *Balanus* sp., *Uca crenulata* y *U. minuca* (Basáñez, 2005).

Estos humedales revisten un importante hábitat para muchas especies de estuario y marinas. La Laguna de Tampamchoco representa también una de las lagunas más ricas en especies de peces, de las cuales están reportadas aproximadamente 179 (Pérez-Hernández y Torres-Orozco, 2000), 66 de moluscos (Reguero *et al.*, 1991), 14 de crustáceos (Chávez, 1967) y 53 de otros organismos (Méndez, 1989).

Las 179 especies de peces que conforman la ictiofauna conocida hasta la fecha para el sistema Tuxpan-Tampamachoco equivalen al 56.3% del total de las especies citadas por Reséndez y Kobelkowsky (1991) para las 13 lagunas costeras más conspicuas del Golfo de

México. En virtud de lo anterior, y tomando en cuenta el estado actual del conocimiento de la ictiofauna estuarina mexicana, este ambiente se destaca como uno de los más ricos en especies de peces de las costas del Atlántico de México, en donde sólo es superado por la Laguna de Términos (Fuentes-Mata, 1991).

Entre las especies reportadas se encuentran *Achirus lineatus* Linnaeus, 1758, *Arius felis* Linnaeus, 1766, *Bairdiella chrysoura* Lacepedes, 1802, *Bairdiella Ronchus* Cuvier, 1830, *Caranx latus* Agassiz, 1831, *Centropomus undecimalis* Bloch, 1792, *Cytharichthys spilopterus*, Gunter, 1862, *Diapterus olisthostomus* Ranzani, 1842, *Eugerres plumieri* Cuvier, 1830 y *Mugil curema* Valenciennes, 1836.

El sistema es utilizado por un gran número de peces como zona de alimentación, protección, crianza, en cuyo análisis un 82% de las 50 especies pertenecen al componente marino, 18% al estuarino: 12% son temporales, 8% permanentes.

#### II.1.6 Usos del agua y suelo

En la Laguna de Tampamachoco los recursos naturales son explotados, entre éstos se registra la pesca de escama, camarón y ostión. En los alrededores de los manglares y humedales de Tuxpan, el cambio de uso del suelo hacia actividades agropecuarias, urbanas e industriales es significativa.

#### II.1.7 Población

Las cinco localidades en la zona de influencia de la laguna son consideradas como no urbanas de acuerdo al XII Censo de Población y Vivienda (INEGI, 2005). La población total es de 1651 personas, distribuidas en Tampamachoco 452, La Mata 901, Barra Galindo 22, Ejido Barra de Galindo 85 y San Antonio 191, de los cuales el 49.12% son hombres y el 50.87% son mujeres (INEGI, 2005).

## II.1.8 Información social y socioeconómica

El grado de marginación de las localidades de acuerdo al Consejo Nacional de Población (CONAPO, 2005) es alto para las localidades de Barra de Galindo, San Antonio y Ejido Barra de Galindo. En contraste, la localidad de Tampamachoco y La Mata reportan un grado de marginación bajo y muy bajo respectivamente. De la población de estas comunidades, un alto porcentaje no cuenta con derechohabiencia a servicios de salud: Barra Galindo (100%), Ejido Barra de Galindo (79%), San Antonio (45%), La Mata y Tampamachoco (60%).

Las principales actividades económicas están relacionadas con la pesca y la industria petrolera, así como la prestación de los servicios turísticos.

## II.1.9 Importancia biológica

Las lagunas costeras son sitios donde muchos organismos viven permanentemente, por lo que tienen una gran importancia pesquera para las comunidades locales. La laguna de Tampamachoco está considerada como el último reservorio de vegetación costera original del municipio de Tuxpan, tiene importancia pesquera especialmente como área ostrícola y como hábitat específico de ciertas especies que penetran a cumplir parte de su ciclo de vida. Una gran variedad de aves se encuentran reportadas para el sitio.

## III. CONTAMINACIÓN ACUÁTICA

En la actualidad, las bahías, estuarios y lagunas costeras del país encaran serios problemas de contaminación ocasionado por actividades humanas (Botello y Páez-Osuna, 1986; Botello,1996) aunado al uso incontrolado de agroquímicos en tierras aledañas, la alteración producida por la tala de la vegetación natural que las rodea, la modificación de su circulación interior por el dragado incorrecto o el desvío de los cauces naturales de los ríos. Son éstos quienes constituyen una de las principales vías de transporte de contaminantes a las zonas costeras, como hidrocarburos, metales, plaguicidas y organoclorados, residuos industriales, productos químicos agrícolas, aguas negras sin tratar y restos de plástico (Cawardine *et al.*,

2006), debido a la gran afinidad que tienen estos elementos para ser transportados en el material suspendido (Acosta *et al.*, 2002). Estos dañan, corrompen y producen un cambio perjudicial en las características físico-químicas y biológicas del agua, afectando nocivamente la flora y fauna de los ecosistemas (Odum, 1986). Prácticamente todas las poblaciones costeras descargan en ellos sus desechos domésticos sin ningún tratamiento previo (Toledo, 2005).

Los contaminantes han generado efectos nocivos para los organismos que habitan los cuerpos de agua, ecosistemas costeros y a la salud pública, especialmente los metales pesados por su inclusión en la cadena alimenticia (Shrivastava *et al.*, 2003), ocasionando daños irreversibles en los ecosistemas marinos (Botello y Páez-Osuna, 1986, Frías-Espericueta *et al.*, 2005). Las afectaciones resultantes de estos problemas se manifiestan en el peso y talla de los organismos, una baja en la población, derivando problemas, económicos, políticos y sociales (Romo- Gómez, 2010).

Los principales problemas que enfrentan las lagunas son la eutrofización, fenómeno provocado por la abundancia de nutrientes y otros agentes de producción primaria, la reducción del oxígeno disuelto debido a la descomposición de la materia orgánica, la salinización causada por altas concentraciones de iones calcio, sodio, cloro y sulfatos, la acidificación resultante del depósito atmosférico de SO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub>, o por las emisiones industriales, compuestos tóxicos acumulativos como metales pesados u otros elementos menores, hidrocarburos, pesticidas, material suspendido y turbiedad (orgánico e inorgánico) y cambio en las condiciones de temperatura (Romo-Gómez, 2010).

### III.1 Problemática ambiental en sistemas acuáticos

La contaminación ambiental es generalizada en muchos países industrializados y en desarrollo y da como resultado la degradación de la tierra, el agua, los sedimentos y el aire con el que todos los organismos vivos interactúan. La contaminación por metales en ambientes acuáticos es de gran preocupación debido a su toxicidad, la abundancia y persistencia en el medio ambiente, y la acumulación posterior en los hábitats acuáticos (Páez-Osuna, 1996, Barlas *et al.*, 2005). El incremento progresivo en su concentración crea problemas en zonas costeras,

lagos y ríos debido al grado de concentración por organismos acuáticos y al transporte a otros tejidos (Páez-Osuna, 1996).

El desarrollo tecnológico, el crecimiento demográfico, la industrialización y el uso de nuevos métodos de agricultura tecnificada son factores que contribuyen a que entren al ambiente de manera continua, cantidades crecientes, de un gran número de sustancias tóxicas, que son aquellas formas de materia que exceden las concentraciones naturales y causan efectos adversos en el medio (Albert, 1999), como sucede en las costas del Golfo de México, donde existe un gran desarrollo en actividades petroleras, portuarias, industriales, acuícolas, pesqueras, turísticas, agrícolas, ganaderas, forestales y de urbanización de los grandes complejos portuarios de Tampico-Madero, Altamira, Veracruz, Alvarado, Coatzacoalcos, Dos Bocas y Ciudad del Carmen y de Brownsville, Corpus Christi, Houston y Galveston en los Estados Unidos de América (Botello *et al.*, 1988; Zárate *et al.*, 1999; Caso *et al.*, 2004) y por los aportes de los ríos, entre los que se encuentran dos que forman los sistemas deltaicos más grandes del Golfo de México: el río Misisipi y el Grijalva-Usumacinta, siendo éstos, fuentes potenciales de contaminantes al medio marino y costero. En estudios realizados por más de 20 años han demostrado la presencia de altas concentraciones por metales tóxicos como el Mercurio (Hg), Plomo (Pb), Cadmio(Cd), Cromo(Cr) y Níquel (Ni), mostrando que los peores problemas de contaminación de metales se producen en cuerpos de agua semi-cerrados como bahías, estuarios y lagunas costeras. En estas áreas los metales se encuentran disponibles en concentraciones elevadas, dependiendo de la naturaleza y el tipo de sedimentos y las características físicas y químicas del agua (Villanueva y Botello, 1992; Botello *et al.*, 2004).

Los tóxicos que entran a las aguas marinas de fuentes municipales, agrícolas e industriales pueden permanecer suspendidos en la columna de agua, ser incorporados a la biota acuática, o depositados sobre el fondo, incorporándose en los sedimentos (González *et al.*, 2006) y el agua intersticial (Páez-Osuna, 2005).

## IV. METALES PESADOS

### IV.1 Definición

El término metal pesado se refiere a cualquier elemento químico metálico con densidad alta, que sea como mínimo 5 veces mayor que la del agua ( $5\text{g/cm}^3$ ) y sea tóxico o venenoso en concentraciones incluso muy bajas. Los ejemplos de los metales pesados incluyen el: Hg, Cd, Cr, Ni, Pb y Co, como metaloides están el As y Se (EPA, 2006).

### IV.2 Origen de los metales pesados

Son materiales que llegan a las aguas costeras de diferente forma: procesos naturales (intemperismo de las rocas, erupciones volcánicas), actividades humanas (empleo de fertilizantes y plaguicidas en zonas agrícolas), escurrimiento (lavado de suelos), ríos, deposición directa, etc., incluso después de pasar a través de sistemas de tratamiento de agua, es bien sabido que las aguas residuales municipales aún contienen una amplia variedad de contaminantes, incluidos los metales pesados como Pb, Zn, Cd, Hg y Cr, que se descargan en ríos o directamente en el mar (Villanueva y Botello, 1992; Luna *et al.*, 2002; Botello *et al.*, 2004; Pardos *et al.*, 2004; Barlas *et al.*, 2005; Ochieng *et al.*, 2006) los cuales son peligrosos para la biota marina, el hombre y el deterioro ambiental en general (Acosta *et al.*, 2002) y es una preocupación creciente como una mayor cantidad de contaminantes potenciales se movilizan para el medio por las actividades humanas (Saha *et al.*, 2006). Por lo tanto, los peces que habitan en estas zonas suelen estar expuestos a concentraciones crónicas de los diferentes compuestos tóxicos (Abascal *et al.*, 2007).

### IV.3 Propiedades físicas y químicas de metales pesados

En general los metales tienen puntos de ebullición y de fusión altos y de acuerdo a la literatura se considera metal pesado a aquel elemento con densidad mayor a  $4.5\text{g/cm}^3$ . La mayoría de los metales son insolubles en agua con un pH neutro o básico, pero fácilmente absorbidos al material particulado, como la materia orgánica e inorgánica (Shrivastava *et al.*,

2003) o los sedimentos, siendo éstos el destino final de los metales en los ambientes acuáticos, en donde la concentración es de  $10^3$  a  $10^7$  veces mayor que la concentración de los mismos en la columna de agua (Botello *et al.*, 2004). Algunos autores han mencionado que bajo ciertas condiciones, los sedimentos del fondo pueden ser una gran fuente secundaria de contaminación del agua (Linnik y Zubenko, 2000).

#### IV.4 Fuentes de metales pesados en el medio ambiente

Los metales pesados se encuentran generalmente como componentes naturales de la corteza terrestre, en forma de minerales, sales u otros compuestos, una vez emitidos, principalmente debido a la actividad industrial y minera, pueden permanecer en el ambiente durante cientos de años, contaminando el suelo y acumulándose en las plantas y los tejidos orgánicos. La peligrosidad de los metales pesados es mayor al no ser degradados o destruidos fácilmente de forma natural o biológica ya que no tienen funciones metabólicas específicas para los seres vivos (Prieto *et al.*, 2009).

El Pb es un metal gris-azulado que ocurre naturalmente en pequeñas cantidades en la corteza terrestre. Es inodoro, insípido y no tiene valor fisiológico conocido. Se encuentra ampliamente distribuido en el ambiente. La mayor parte proviene de actividades antropogénicas como la minería, manufactura industrial y de quemar combustibles fósiles. Se presenta en forma natural en las rocas, en los suelos en una proporción que varía entre 2 y 200 ppm. El mineral más rico es la galena (sulfuro de plomo) y constituye la fuente principal de producción comercial de este metal. El Pb tiene muchos usos diferentes: en la fabricación de baterías, municiones, productos de metal (soldaduras y cañerías) y en láminas de protección contra los rayos X. Debido a inquietudes sobre salud pública, la cantidad de Pb en pinturas y cerámicas y en materiales para calafatear y soldar se ha reducido considerablemente en los últimos años.(ATSDR, 2007).

El Cd es un elemento natural de la corteza terrestre. Sus propiedades físicas y químicas son muy similares a las del Zinc (Zn) con frecuencia coexiste con este metal en la naturaleza. En los minerales y las menas, la proporción de Cd y Zn suele oscilar entre 1:100 a 1:1.000. Generalmente se encuentra como mineral combinado con otros elementos tales como oxígeno

(óxido de cadmio), cloro (cloruro de cadmio) o azufre (sulfato de cadmio, sulfuro de cadmio). El Cd no se corroe fácilmente y tiene muchos usos tales como baterías, pigmentos, revestimiento de metales y plásticos (ATSDR, 2008a).

El Cr es un elemento natural que se encuentra en rocas, animales, plantas y el suelo. Los compuestos de cromo no tienen ningún sabor u olor especial y dependiendo de la forma que toma puede encontrarse en forma de líquido, sólido o gas. El Cr elemental no se encuentra como tal en la naturaleza; forma diversos compuestos en distintos estados de oxidación. Las formas más comunes son el Cr (0), Cr (III) y Cr (VI). El Cr metálico, que es la forma de Cr (0), se usa en la fabricación de acero. El Cr (VI) y el Cr (III) se usan en cromado, colorantes y pigmentos, curtido de cuero y preservación de madera (ATSDR, 2008b).

El cobre (Cu) es un metal que ocurre naturalmente en el ambiente en rocas, el suelo, el agua y el aire. Es un elemento esencial para plantas y animales (incluso seres humanos), lo que significa que es necesario para la vida. Por lo tanto, las plantas y los animales deben absorber Cu de los alimentos o bebidas que ingieren, o del aire que respiran. Los compuestos de Cu son usados comúnmente en la agricultura para tratar enfermedades de las plantas, como el moho, para tratar agua, y como preservativos para alimentos, cueros y telas. El Cu se usa para fabricar muchos productos diferentes, como por ejemplo, alambres, cañerías y láminas de metal. El Cu también se combina con otros metales para fabricar cañerías y grifos de latón y bronce (ATSDR, 2004).

El Bario (Ba) es un metal blanco-plateado que existe en el ambiente solamente en minerales que contienen mezclas de elementos. Se combina con otras sustancias químicas, por ejemplo azufre, carbono y oxígeno, para formar compuestos de bario. Es abundante en la naturaleza y representa aproximadamente el 0,04 % de la corteza terrestre. Sus principales fuentes son los minerales barita (sulfato de bario,  $\text{BaSO}_4$ ) y witherita (carbonato de bario,  $\text{BaCO}_3$ ). Los compuestos de Bason usados por las industrias de gas y petróleo para fabricar lodos de perforación. Los lodos de perforación facilitan la perforación a través de rocas manteniendo lubricada a la barrena. También se usan para fabricar pinturas, ladrillos, cerámicas, vidrio y caucho (ATSDR, 2004).

El Hg inorgánico se encuentra en la naturaleza en forma de sulfuro (HgS), como mineral de cinabrio, que tiene un contenido medio de mercurio del 0,1 al 4 %. El Hg es un metal que ocurre en forma natural en el ambiente y que tiene varias formas químicas. El Hg metálico es un líquido inodoro, de color blanco-plateado brillante. Al calentarlo se transforma en un gas inodoro e incoloro, mucho más pesado que el agua. Se utiliza en termómetros, barómetros, esfigmomanómetros (instrumentos empleados para medir la presión arterial), termostatos de pared para la calefacción y el aire acondicionado, bombillas y tubos fluorescentes, algunas baterías, interruptores de luz eléctrica, algunos reguladores de contadores de gas usados en interiores (ATSDR, 1999).

#### IV.5 Metales pesados en agua y sedimentos

La presencia de elementos metálicos en sistemas acuáticos fluviales y costeros se origina por las interacciones del agua con los sedimentos y la atmósfera con la que está en contacto, produciéndose fluctuaciones en las concentraciones en el agua, como resultado de las fuerzas hidrodinámicas naturales, biológicas y químicas (Rainbow, 1995).

Los ríos tropicales son fuentes importantes de metales pesados para el ambiente marino costero (Shumilin *et al.*, 2005), numerosas investigaciones han demostrado que varios productos químicos en el río y las aguas marinas inmovilizan, matan, inhiben el crecimiento, o reducen la reproducción de los organismos acuáticos (Murano *et al.*, 2007).

La contaminación por metales pesados es muy pronunciada en los sitios donde las corrientes de reflujos y de agua son reducidas como las aguas costeras y estuarios, por ejemplo, los niveles de Hg en el agua de mar son variables y van del orden de 0.5 a 20 ng/l, en cambio, en las aguas costeras son mayores, aumentando notablemente en aquellas áreas directamente afectadas por actividades antropogénicas (Villanueva y Botello, 1992).

Los efectos en los sistemas acuáticos de los metales pesados, su biodisponibilidad y toxicidad están estrechamente relacionados con la distribución de las especies en las fases sólida y líquida de las masas de agua. Por ejemplo, la liberación de metales pesados de los sedimentos

promueve, un déficit de oxígeno disuelto, una disminución en el pH y potencial redox (Eh), un aumento en la mineralización y en la concentración de materia orgánica disuelta (DOM) (Linnik y Zubenko, 2000). Este fenómeno es uno de los problemas más graves que los metales pesados presentan como contaminantes del medio acuático (Mandelli, 1979).

Altos niveles de contaminantes en agua y sedimentos pueden causar efectos adversos potenciales irreversibles a los ecosistemas y también plantean riesgos para la salud humana y de los animales acuáticos, ya sea directamente por la absorción por los animales de los materiales del agua, o indirectamente a través de su dieta. Como los organismos acuáticos son una parte de la dieta natural de los mamíferos acuáticos y de los organismos terrestres (aves, el hombre) su salud también es motivo de preocupación cuando los sistemas de agua están contaminados (Pham *et al.*, 2007). La contaminación de los sedimentos por metales pesados y otros contaminantes es considerada por muchos organismos reguladores a ser una de las principales amenazas para los ecosistemas acuáticos. En diversas investigaciones se han identificado efectos cancerígenos, el deterioro de la capacidad reproductiva, los impactos a la estructura de la comunidad y la salud de la biota en sitios de sedimentos contaminados (Pardos *et al.*, 2004).

Los metales más problemáticos para el medio son el mercurio Hg, Cd, Pb y As ya que son abundantes en la corteza terrestre, son tóxicos para el hombre y pueden causar perturbaciones considerables en los ciclos biogeoquímicos (EPA, 2005, Goldaracena, 2007). La toxicidad de una sustancia química depende de sus dosis o de su concentración, además de la susceptibilidad de cada persona. En pequeñas cantidades es probable que una sustancia química no tenga consecuencias para la salud, pero en grandes cantidades puede causar efectos adversos (Goldaracena, 2007).

#### IV.6 Metales pesados en animales.

Dentro de la cadena alimenticia, los organismos fotosintéticos son las principales vías de acceso de los metales pesados hacia los animales y el ser humano (Lokeshwari y Chandrappa, 2007). Por ejemplo, determinadas algas son acumuladoras de metales pesados y a partir de su ingestión, estos contaminantes pueden introducirse en las redes tróficas, acumulándose cada vez

más en los distintos escalones de la pirámide alimenticia. La contaminación química en especial por metales pesados, constituye una de las más peligrosas para los ecosistemas acuáticos y las especies presentes en ellos. Los peces tienen la capacidad de almacenar en sus órganos una concentración mayor de estos compuestos en comparación con la presente en el medio, y están determinados principalmente por el nivel de contaminación de agua y alimentos, por lo que son un indicador importante de la contaminación, pero también esto implica que su consumo se puede convertir en un problema de salud para las poblaciones que se alimentan de este recurso (Mancera y Álvarez, 2006, Suicmez *et al.*, 2006).

Desde el punto de vista de la fisiología, el comportamiento de los metales en los organismos acuáticos depende de factores como: su absorción, excreción, almacenamiento y eficiencia de su sistema de regulación o desintoxicación (Botello *et al.*, 2004), así como también existe una numerosa cantidad de factores que tienen influencia sobre su toxicidad en los organismos acuáticos y que pueden ser de tipo fisicoquímico y biológico. Los primeros involucran a todos aquellos parámetros (temperatura, pH, dureza) que afectan la especiación química de los metales, con la presencia de otros de otros metales y de otros contaminantes (plaguicidas, hidrocarburos del petróleo). Los factores biológicos que influyen o tienen relación con los efectos de los metales, están estrechamente vinculados con las condiciones propias de los organismos como son la talla, peso, sexo, estadio, madurez gonádica, capacidad de adaptación, hábitos alimenticios (Páez-Osuna, 2005), abundancia (Andreji, 2004, Ochieng *et al.*, 2006), edad, migración, dinamismo, metabolismo y sobre todo con la diferente afinidad de los metales por órganos específicos, particularmente los altamente tóxicos como el As, Cd, Hg y Pb debido a que afectan a especies con importancia económica a escala nacional (Botello *et al.*, 2004).

La contaminación por metales pesados presenta cuatro particularidades que la hacen especialmente peligrosa: 1) Toxicidad: a determinadas concentraciones, en el agua o los sedimentos, implicará la muerte por envenenamiento de las especies que habitan el medio; 2) Persistencia: los metales pesados no son biodegradables por lo que permanecen en el medio durante largos períodos; 3) Bioacumulación: que hace referencia a la acumulación neta en un organismo de metales provenientes de fuentes bióticas (otros organismos) o abióticas (suelo, aire y agua) y 4) Biomagnificación: tendencia de algunos productos químicos de acumularse a lo

largo de la cadena trófica, exhibiendo concentraciones excesivamente mayores al ascender el nivel trófico. La bioacumulación en peces puede ser afectada por el hábitat, régimen alimentario, naturaleza y cantidad de alimento disponible para el bentos, de igual manera influyen las estaciones climáticas. Los iones metálicos tóxicos suelen penetrar a la célula a través de los mismos sistemas de captación que utilizan los iones metálicos fisiológicamente importantes como Ca, Mg, Cu y Zn (Cervantes, 1999).

Una de las primeras hipótesis que se manejan para explicar la toxicidad de los metales en los peces, es que ésta es originada por la asfixia que sobreviene de la coagulación de las mucosidades sobre las branquias, la cual parece ser justificada en altas concentraciones, pero no para concentraciones menores (Páez-Osuna, 2005).

Debido a la capacidad que tienen los metales pesados para formar complejos con la materia orgánica, tienden a fijarse en los tejidos de los organismos expuestos y su acumulación se presenta en diferentes grados de concentración, dependiendo de las características bioquímicas de cada tejido y por el nivel de contaminación del agua y los alimentos (Farkas *et al.*, 2000). Por ello, las concentraciones son un indicador del nivel de la contaminación en el ambiente. Algunos metales pesados tienen efecto en la acumulación en peces y plantean posibles riesgos de contaminación grave. La evaluación de su efecto se hace desde los puntos de vista: toxicológicos, ecológicos, aspectos de higiene y de cría (Andreji, 2004).

Los contaminantes pueden llegar a través de la cadena trófica y la mayoría de las veces no es posible determinar su origen, ocasionado por la movilidad, variaciones en el régimen alimentario, amortiguamiento de las diferencias temporales y espaciales de los contaminantes (Villanueva y Botello, 1988). Las cadenas alimentarias terrestres y acuáticas son capaces de acumular ciertos contaminantes ambientales a concentraciones tóxicas (Barlas *et al.*, 2005 y Khaniki *et al.*, 2005).

En general, el orden de presencia de metales pesados en la red trófica es agua <sedimentos > invertebrados > peces (Deacon y Driver, 1999), este fenómeno se da ya que los oligoelementos son ingeridos con las partículas (sedimentos de agua o sedimentos en suspensión en la columna

de agua) por los organismos bentónicos y a continuación se pueden acumular y moverse a través de la cadena alimentaria, a lo cual se le conoce como proceso de biomagnificación (Heiny y Tate, 1997).

#### IV.7 Impacto de los metales pesados en la salud humana

Todos los organismos requieren para su adecuado crecimiento elementos como Fe, Cr, Zn, Cu y Co en cantidades diferentes ya que desempeñan papeles fisiológicos vitales. Los metales pesados son componentes naturales de la corteza terrestre que se incorporan al cuerpo humano vía el alimento, el agua y el aire. En dosis bajas son indispensables para la vida ya que forman parte de sistemas enzimáticos, proteínas de las vías respiratorias y algunos elementos estructurales de los organismos como el Cu, Co, Zn, Mo o el Fe (en la hemoglobina), denominados metales pesados esenciales, su ausencia causa enfermedades. Los no esenciales son aquellos que no presentan ninguna función biológica, como el Cd y Hg que pueden llegar a ser incluidos en procesos celulares esenciales y no esenciales. En cualquier caso, cuando los metales se encuentran biodisponibles por encima de determinadas concentraciones, ambos, esenciales o no, pueden producir efectos adversos en los organismos. Una característica importante de estos metales es que no pueden ser degradados biológica ni químicamente, solo pueden acumularse o alterarse para su extracción (Gorski y Nugegoda, 2006 y Goldaracena, 2007).

Los metales poseen una gran capacidad para unirse con diferentes tipos de moléculas orgánicas, los procesos de bioacumulación son debidos básicamente a la imposibilidad, por parte del organismo afectado, de mantener los niveles necesarios de excreción del contaminante, ya que dichos elementos no son química ni biológicamente degradables, por lo que los seres vivos sufren una retención del interior del mismo. La bioacumulación se da en seres humanos, animales y plantas las cuales también poseen la característica de absorberlos (Codina y Pérez, 2006).

El proceso se agrava a lo largo de las cadenas tróficas, debido a que los niveles de incorporación sufren un fuerte incremento a lo largo de sus sucesivos eslabones, siendo en los

superiores donde se hallan los niveles más altos de contaminantes. Una vez incorporados en los tejidos, los metales son capaces de reaccionar con una gran variedad de sustancias. Sus efectos tóxicos específicos sobre un sistema biológico, dependen de reacciones con ligandos (iones o moléculas que rodean a un metal, formando un complejo metálico), que son esenciales para la función normal de ese sistema (Codina y Pérez, 2006).

Ciertos metales, como Cd, Pb, Hg y Cr se acumulan en tejidos humanos, especialmente como riñón y pulmón, alterando sus funciones básicas y provocando efectos tóxicos como neumonía, disfunción renal y enfisemas. En intoxicaciones crónicas son habituales las osteopatías que parecen estar relacionadas con alteraciones del metabolismo del calcio y algunos tipos de cáncer relacionados con el aparato reproductor masculino. El poder cuantificar los efectos subletales que los metales pesados producen en los sistemas vivos permite anticipar una serie de alteraciones fisiológicas, como desórdenes neurológicos, alteraciones de las actividades enzimáticas, efectos mutagénicos y carcinogénicos, desarrollo de parásitos y enfermedades y fallas en la reproducción (Villanueva y Botello, 1988).

El consumo de determinadas sustancias nocivas se considera un riesgo sustancial para la salud, incluso cuando las concentraciones de estas sustancias son relativamente bajas, lo cual es debido principalmente a un largo período de exposición. Esto se aplica particularmente a las sustancias, las cuales tienden a acumularse en el cuerpo, como el Cd. El Cd se acumula en el organismo humano, fundamentalmente en los riñones, causando hipertensión arterial. La absorción pulmonar es mayor que la intestinal, por lo cual, el riesgo es mayor cuando el cadmio es aspirado. El consumo de Cd puede ser causa de diversos problemas en el hombre (diarreas, vómitos severos, fractura de huesos, sistema nervioso central, inmune, desórdenes psicológicos y cáncer) (Erzen y Kragelj, 2006).

El Cr produce afecciones locales: sobre la piel causan dermatitis, sensibilización de la piel, es irritante de la piel y mucosas. Afecciones generales: produce tos, bronquitis crónica, ulceraciones del tabique nasal y piel, dolores respiratorios y de cabeza, hemorragia nasal, dermatitis, etc. Los metales tóxicos pueden alterar muchos procesos fisiológicos y bioquímicos,

ya sea en sangre o en tejidos, incluyendo las deformaciones estructurales de los animales acuáticos (Barlas *et al.*, 2005).

Para la biota, incluido el ser humano, el plomo es un elemento no esencial y potencialmente nocivo. Es importante, ya que su consumo puede ser causa de perturbación en la síntesis de hemoglobina, además, de favorecer la anemia, trastornos del sistema nervioso, incremento de la presión sanguínea, daño a los riñones y abortos, entre otros (Wright, 2002). Es especialmente perjudicial en el desarrollo de los niños, provoca disfunciones fisiológicas, bioquímicas y de comportamiento. Cuando este metal alcanza niveles tóxicos provoca la disminución de la fotosíntesis vegetal y el desarrollo de anemia en mamíferos. En las plantas además del efecto ya mencionado, se le atribuye la reducción en el crecimiento, en la biomasa y la transpiración; además de lesiones cromosómicas, inhibición de la división celular e interferencia con enzimas ligadas al metabolismo del nitrógeno (Andra *et al.*, 2006).

El Hg es metal no esencial, muy tóxico para los seres vivos. En bajas concentraciones, la forma elemental y los compuestos orgánicos e inorgánicos son altamente nocivos, se sabe que son capaces de dañar el sistema nervioso central, como otros metales en condiciones naturales sólo una pequeña parte del Hg se encuentra disuelto en el agua de mar y estuarios (Villanueva y Botello, 1992).

#### IV. 8 Efecto de los metales pesados en la biota

En animales acuáticos, el proceso de captación de metales pesados se efectúa a través de la columna del agua mediante 3 procesos principales: a través de superficies respiratorias como las branquias, adsorción del agua o las superficies corporales y a través del aparato digestivo y sus efectos subletales en una gran variedad de organismos conducen a cambios en su morfología o histología: fisiología (crecimiento, desarrollo, capacidad de nado, respiración y circulación, bioquímica (química sanguínea, actividad enzimática), endocrinología, conducta, reproducción y mortalidad (Storelli *et al.*, 2006).

A nivel celular y molecular se relacionan principalmente en su interacción con los grupos sulfhidrilo (-SH), también se enlazan a grupos carboxilos (-COOH) y aminos (-NH<sub>2</sub>) de las proteínas. A nivel subcelular, los principales sitios de acción de los metales pesados son las mitocondrias, la membrana plasmática y el citoesqueleto (Cervantes, 1999). Estos contaminantes además de acumularse, resultan a menudo magnificados entre los seres vivos a medida que circulan por los ciclos biogeoquímicos y las cadenas alimenticias (Odum, 1986; Albert, 1999).

Los efectos de los metales en organismos acuáticos son múltiples, se ha observado que el Cd es un xenobiótico importante en los ecosistemas acuáticos, no nutriente para la biota (Kochhann *et al.*, 2009), se acumula principalmente en el hígado y el riñón de los organismos, con efectos adversos en el crecimiento, la reproducción y el sistema respiratorio. Produciendo malformación en ojos, agotamiento del contenido de glucógeno y muerte de peces, además reduce la tolerancia térmica (Wu y Deng, 2006).

El Cr hexavalente en peces marinos provoca problemas respiratorios y decoloración en sus tejidos. El Hg inorgánico tiene una toxicidad aguda en los peces en niveles de 1 mg/L y exposiciones por más de 10 días de 0.010 a 0.020 mg/L, se sabe que son fatales, produce un crecimiento retardado y algunos peces son severamente atrofiados, el desove es inhibido en niveles de exposición de 0.001 mg/L. El Hg es uno de los metales más tóxicos en el medio natural a causa de sus numerosas fuentes naturales y antropogénicas, su volatilidad, la movilidad y la persistencia en el ambiente. Las tres formas más comunes de Hg en el ambiente son el Hg elemental (Hg<sup>0</sup>), el Hg divalente inorgánico (Hg II) y el orgánico o metilmercurio (CH<sub>3</sub>Hg), que se bioacumula en los niveles tróficos superiores y es más tóxico para los organismos en la parte superior de la cadena alimentaria (Guentzel *et al.*, 2007). El metilmercurio es un ecotoxicante que se bioacumula en las especies de peces e invertebrados marinos (>90%). La ingestión de alimentos contaminados (sobre todo pescado) representa el mayor riesgo de intoxicación por mercurio, debido a su biotransformación y magnificación biológica a través de la cadena trófica, mientras que la baja solubilidad del mercurio en agua reduce los riesgos derivados de la ingestión de agua contaminada (Voegborlo *et al.*, 2004).

Debido a la toxicidad de los contaminantes de Hg en el medio acuático, éste causó la enfermedad de Minamata (Ui y Kitamura, 1971; Chandrajith y Okumura, 1996). La contaminación de Hg en peces, mariscos y ostras es una gran preocupación de los seres humanos en los lugares contaminados (Khaniki *et al.*, 2005).

Los efectos crónicos y agudos del Pb incluyen efectos histopatológicos, deformidades, neurotoxicidad, anemia hemolítica e inhibición en la síntesis de hemoglobina, estos efectos ocurren en peces, aun en concentraciones tan bajas del elemento en el agua como de 8 µg/L (Wright 2002, Páez-Osuna, 2005). La mayoría de compuestos de Pb utilizados como aditivos en la gasolina, pueden ser transportados por la atmósfera y aparecer en sedimentos de una cuenca, el cual proviene de la escorrentía urbana, después de haber sido emitidos por los vehículos, luego depositados en la calle y lavados fuera por la lluvia (Shrivastava *et al.*, 2003).

Dentro de los metales pesados hay dos grupos: a) Oligoelementos o micronutrientes que son los requeridos en pequeñas cantidades, o cantidades traza por plantas y animales. Son necesarios para que los organismos completen su ciclo vital, pasado cierto umbral se vuelven tóxicos. Su ausencia causa enfermedades, su exceso intoxicaciones y b) los metales pesados sin función biológica conocida, cuya presencia en determinadas cantidades en seres vivos lleva aparejadas disfunciones en el funcionamiento de sus organismos. Resultan altamente tóxicos y presentan la propiedad de acumularse en los organismos vivos. La toxicidad de estos metales se debe a su capacidad de combinarse con una gran variedad de moléculas orgánicas, pero la reactividad de cada metal es diferente y consecuentemente lo es su acción tóxica. Una de las principales características de los metales encontrados en los ecosistemas costeros es que los organismos pueden almacenar grandes concentraciones de un metal (bioacumulación) y, en consecuencia, este lleva a un aumento de las concentraciones de metales en los niveles tróficos superiores (biomagnificación), así en los océanos y las zonas costeras los organismos con hábitos bentónicos son los más afectados por la contaminación de algunos metales pesados de naturaleza tóxica como el Hg, Pb, Cr, y Cd, debido a su interacción directa con los sedimentos, los cuales pueden tener severos efectos en la salud de los organismos, reduciendo drásticamente su potencial de sobrevivencia y, en ocasiones propician su total desaparición. El Cu y el Hg alteran procesos de alimentación, actividad natatoria y el aprendizaje (modificaciones en el

comportamiento) (Laws, 1993; Courtney y Clements, 2002; Huang, 2003; Botello *et al.*, 2004, Gorski y Nugegoda, 2006).

El metil mercúrico es el mejor ejemplo documentado de alta bioacumulación. Eventualmente estos contaminantes amenazan la salud de los seres humanos mediante el consumo de mariscos y pescados (Huang, 2003). Los efectos indirectos incluyen las modificaciones de las interacciones entre especies y las reducciones en la calidad de los alimentos (Courtney y Clements, 2002).

En los cuerpos lagunares, los metales pesados se pueden encontrar disueltos en el agua en tres distintas formas: coloidal, partículas minerales y cationes o iones complejos. Las formas coloidales dan lugar a los hidróxidos, las partículas minerales se refieren a todas aquellas partículas que se encuentran suspendidas en el agua y los cationes o iones complejos son la fase disuelta, que son captadas por los organismos y las arcillas y es esta última fase la que ocasiona la fijación del metal en el tejido orgánico, debido a la biodisponibilidad que presenta el metal en forma de catión, provocando que el metal interfiera en funciones básicas del organismo (Botello *et al.*, 1996)

#### IV.9 Cinética de los metales pesados

La minería en México produce grandes cantidades de residuos sólidos y líquidos que constituyen una fuente potencial de contaminación. En las zonas mineras, la principal fuente de contaminación es la formación de drenaje ácido de minas (AMD), que desempeña un papel importante en la solubilización, transporte y liberación de metales al ambiente. El drenaje ácido de minas también puede promover la disminución del pH de los cuerpos de agua y las alteraciones de Eh (potencial de óxido-reducción y conductividad) (Arcega-Cabrera *et al.*, 2005).

Una vez en la interface sedimento-agua o en la columna de agua, los metales son más propensos a transportar y entrar a la red alimentaria. Atchinson *et al.* (1977) han demostrado que los sedimentos contienen toxinas que pueden acumularse en peces indirectamente a través de la red alimentaria o directamente de la exposición debida a los sedimentos re-suspendidos. Una

gran cantidad de metales tóxicos como Cd, Pb y Hg ocurre naturalmente en el agua de mar o agua del lago (Barlas *et al.* 2005)

Entre los factores que afectan su acumulación y disponibilidad, está el pH. La mayoría de los metales son insolubles a pH neutros o básicos y tienden a estar más disponibles a pH ácido. El pH tiene un importante efecto sobre la materia orgánica. Es un parámetro importante para definir la movilidad del catión, debido a que en medios de pH moderadamente alto se produce la precipitación como hidróxidos, con fuerte tendencia a ser adsorbidos, disminuyendo su biodisponibilidad en el agua. En medios muy alcalinos, pueden nuevamente pasar a la solución como hidroxicomplejos. Si el pH es elevado entonces puede bajar la toxicidad metálica por precipitación como carbonatos e hidróxidos (Botello *et al.*, 2004)

El agua de mar tiene un alto contenido de iones  $\text{Cl}^-$ , además de iones  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{CO}_3^{2-}$  que determinan la salinidad, son los responsables de la estabilidad del pH, los cuales participan en el secuestro directo o por acomplejamiento de los metales, por esta razón la potencia de un contaminante ha sido inversamente relacionada con la cantidad de sales existentes en el medio. La salinidad modifica la captación de los metales pesados, bajas salinidades, incrementan su biodisponibilidad y la incorporación debido a los cambios en la especiación química del metal, por los efectos del metal en los mecanismos de regulación iónica y osmótica en el organismo al bajar la salinidad (Rainbow, *et al.*, 1993).

Es conocido que el metabolismo de los peces y por lo tanto la ventilación de las branquias aumenta con el incremento de la temperatura, hecho que probablemente aumente la exposición de los peces a los metales pesados en ambientes contaminados. Los estudios realizados en diversas especies revelan que al aumentar la temperatura en el medio acuático aumenta también la toxicidad de algunos metales pesados (Espina y Vanegas, 2005).

Se conoce que el efecto de ciertos contaminantes es mayor cuando la concentración de oxígeno en el medio disminuye. Los animales son capaces de tolerar una reducción en el oxígeno ambiental producido por las temperaturas altas, pero si se suma el estrés producido por un tóxico, puede ser fatal. En ambientes hipotóxicos, el organismo puede compensar la carencia de oxígeno, aumentando el volumen de ventilación branquial, incrementando la captación de

oxígeno pero también la captación de sustancias tóxicas. En peces se ha observado que, en presencia de metales pesados, aumenta el consumo de oxígeno (Cairns y Garton, 1982, Espina y Vanegas, 2005).

#### IV.10 Legislación sobre niveles de metales pesados

Para evaluar la presencia de metales pesados en agua y peces, existen algunas normatividades en México:

- A) Los Criterios Ecológicos de la Calidad del Agua en México (CECA) (SEDUE, 1989) los cuales especifican las concentraciones máximas que pudiera tener el agua para sus diferentes usos.
- B) NOM-001-SEMARNAT-1996 establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.
- C) Norma Oficial Mexicana NOM-242-SSA1-2009, productos y servicios. Productos de la pesca frescos, refrigerados, congelados y procesados.
- D) NOM-027-SSA1-1993. Bienes y servicios. Productos de la pesca. Pescados frescos, refrigerados y congelados. Especificaciones sanitarias
- E) NOM -001-ECOL-1996. Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.
- F) Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología. 1990
- G) Food and Drug Administration (1978).
- H) Oficina Central del Gobierno de Hong Kong (Nauen, 1983)

## V.- ANTECEDENTES

En México se han realizado diversos estudios en cuanto a metales se refiere. Específicamente hay investigaciones que presentan los niveles de concentraciones de diferentes metales pesados en organismos acuáticos (Botello *et al.*, 1998). Sin embargo, no existe una regulación o legislación de los límites máximos permisibles de algunos metales pesados en organismos marinos o de agua dulce, haciendo necesario recurrir a la legislación internacional para tener un marco de referencia. Los datos de la concentración de metales en aguas costeras del Golfo de México son muy escasos, debido al grado de dificultad que representa su cuantificación, el contenido, distribución y comportamiento de los metales en agua (Villanueva y Botello 1998; Caso, 2004).

Villanueva-Estrada (2000) llevaron a cabo un estudio de metales disueltos (Cu Cr, Ni, V y Ti) en agua de fondo, en cuatro zonas del sur del Golfo: i) zona A, localizada cerca de la descarga de los ríos Grijalva-Usumacinta; ii) zona B, localizada dentro de la zona de exclusión de PEMEX, al suroeste de la misma; iii) zona C, localizada dentro de la zona de exclusión de PEMEX, al noreste de la carbonatada. Los valores más altos obtenidos de Cu se ubican en la zona D, donde también se obtuvieron los valores más altos de materia orgánica disuelta con la cual se asocia el Cu. Los valores más altos de Cr, Ni y Ti se localizaron en la zona A y se asocian con las descargas de los ríos Grijalva, Usumacinta. El valor más alto de V (28.7  $\mu\text{g L}^{-1}$  en promedio) se presentó en la zona C y se atribuyó a las actividades de extracción de hidrocarburos.

Rosales *et al.* (1994) en la Sonda de Campeche evaluaron el impacto de las actividades de explotación petrolera que se llevan a cabo en el área, encontrando valores de 18 mg/kg de Pb, de 66 a 366 mg/kg de Cr con un promedio de 166 mg/kg, 767 mg/kg Ba (Caso, 2004). Macías - Zamora *et al.* (1999) evaluaron 26 núcleos de sedimentos en la plataforma de Campeche, registrando las concentraciones de Cu, Ni, Zn, Cr, Cd, Pb V, Mn, Fe. La mayoría de los metales mostraron una mayor concentración hacia el suroeste del Banco de Campeche y concentraciones bajas hacia la plataforma de Yucatán. Posteriormente, Vázquez *et al.* (2002) colectaron 28 muestras de sedimento en el sureste del Golfo de México desde la desembocadura del río

Coatzacoalcos hasta la laguna de Términos concluyendo que el Si, Al, Fe, Na, Mg, Ca, K con excepción de Ca y Si no mostraron una variación significativa entre estaciones.

Con respecto a los niveles de metales en los sedimentos de las áreas costeras del Golfo de México, éstos son de varios órdenes de magnitud mayores a los determinados en columna de aguas costeras y mar abierto. Los niveles de concentración y distribución de Pb, Cd y Cr en los sedimentos, con algunas excepciones, están en un intervalo similar a zonas costeras no impactadas. Los estudios de concentración de metales en sedimentos de la plataforma continental del Golfo de México son escasos (Caso, 2004).

Villanueva y Botello (1992) realizaron una recopilación de datos sobre concentraciones de algunos metales pesados no esenciales (Hg, Pb, Cd y Cr) en agua, sedimento y organismos (*Crassostrea virginica*) de las zonas costeras del Golfo y el Caribe Mexicanos desde 1972 a 1992, en el cual están incluidas lagunas costeras y ríos, encontrando que los estados que han presentado mayor impacto por Hg y Pb son Veracruz (Laguna de Pueblo Viejo y Río Coatzacoalcos), Tabasco (Laguna de las Ilusiones) y en menor magnitud Campeche (Laguna de Términos), mientras que Quintana Roo (Laguna de Nichupté), el impacto de la contaminación por metales pesados es aún nulo, debido a la ausencia de actividad industrial en la zona.

Ponce (1995) realizó un estudio en sedimentos superficiales a lo largo de la plataforma de Tamaulipas. Los valores de concentración más altos de metales están asociados a la desembocadura del río Soto la Marina a excepción del Cr cuyo valor más alto corresponde al extremo norte del área de estudio. En la plataforma continental del estado de Veracruz, la misma autora colectó muestras de sedimento superficial frente a la desembocadura de los ríos Coatzacoalcos y Tonalá y frente a la laguna del Carmen. Los valores más altos se encontraron en la estación localizada al sur de la desembocadura del río Coatzacoalcos, cerca de la costa. También se estudiaron los sedimentos superficiales frente a la desembocadura del río Grijalva donde los valores más altos se encontraron en las estaciones localizadas más alejadas de la costa. De las tres áreas estudiadas de la plataforma (Tamaulipas, Veracruz y Tabasco), los valores más altos de Ni, Zn y Cr se registraron en la plataforma continental del estado de Tabasco; los de Cu

y Pb en el sur de Veracruz y los de Cd correspondieron a la plataforma continental de Tamaulipas.

Veracruz es uno de los estados con mayor porcentaje de escorrentía, lo que permite el acarreo de desechos desde puntos distantes hacia el mar, con importantes implicaciones de contaminación en sus aguas, ya que los desechos que se vierten a las cuencas llegan a la costa, en su mayor parte sin tratamiento alguno. Se han detectado 13 contaminantes desechados por la industria o centros urbanos a los receptores finales, ríos o lagunas en el estado de Veracruz; algunos por sus características propias, presentan efectos a largo plazo afectando al hombre como son: metales pesados, plaguicidas, otros son de efecto limitado y de poco alcance como algunas partículas sedimentables o materia flotante y otros más son los que presentan un efecto perjudicial transitorio aunque muy severo como la temperatura, materia orgánica y cianuros (Guzmán *et al.*, 2005).

En un estudio realizado en las costas del estado de Veracruz por Vázquez *et al.* (1991) encontraron concentraciones de Ni entre 82 y 113 mg/kg con un promedio de 95.5 mg/kg. Los valores fueron muy similares a los muestreos realizados en noviembre y diciembre, las muestras más alejadas de la costa muestran los valores más altos, lo que se atribuye a los procesos diagenéticos. Las concentraciones de V en los sedimentos del área se presentaron en un intervalo de 39 y 63 mg/kg con un promedio de 45.5 mg/kg, con valores muy similares entre ambos cruceros realizados (Caso, 2004).

En algunas lagunas del estado de Veracruz se han evaluado concentraciones de algunos metales pesados biodisponibles en el agua, como es el caso de la Laguna de Mandinga donde se han reportado valores desde 11 a 22  $\mu\text{g/g}^{-1}$  de Pb, 0.80  $\mu\text{g/g}^{-1}$  de Cd, 0.96  $\mu\text{g/g}^{-1}$  de Cr, 3.68  $\mu\text{g/g}^{-1}$  de Ni, 4.01  $\mu\text{g/g}^{-1}$  de Cu, 4.82  $\mu\text{g/g}^{-1}$  de Zn (Vázquez *et al.*, 1995). Hernández (1994), reportó que Mandinga presenta las concentraciones más altas de Ni, Pb y Zn totales en sedimento y Alvarado la de Cu, aunque cabe señalar que las concentraciones de estos metales en ambas lagunas son similares.

En la laguna Tamiahua la concentración promedio más alta corresponde al Cd y Cr, la concentración promedio de Cd total está por encima de  $1.2 \mu\text{g/g}^{-1}$ , valor que en sedimento produce efectos biológicos (Guzmán *et al.*, 2005). El monitoreo de metales pesados Pb, Cr, Cd y Hg en agua, sedimento y ostión, ha mostrado que a pesar de encontrarse estos metales en el agua en concentraciones por debajo del límite máximo permisible, los organismos lograron acumular principalmente cadmio por arriba del límite permisible para su consumo Sin embargo, a pesar de la gran importancia que presenta esta zona en el ecosistema marino aledaño poco se ha estudiado sobre la contaminación por metales pesados en el agua y las especies que en ella habitan (Contreras, 1985).

Las mayores concentraciones de Pb en el total de los sistemas costeros del estado de Veracruz se han registrado en la Laguna del Llano ( $77.2 \mu\text{g/g}^{-1}$ ), Laguna Salada ( $78.8 \mu\text{g/g}^{-1}$ ) y Laguna La Mancha ( $81.1 \mu\text{g/g}^{-1}$ ), cerca de la planta de energía nuclear Laguna Verde (Botello *et al.*, 2004).

En la laguna de Tampamachoco se han detectado elevadas concentraciones de Cr en agua que oscilan entre 0.005 a  $5.09 \mu\text{g/g}$  superando los límites permisibles por la Normas Mexicanas (Criterios Ecológicos de Calidad del Agua, 1989; Rosas *et al.*, 1983). Pérez-Hernández *et al.* (1994) reportaron que los sedimentos de este cuerpo de lagunar, contenían altas concentraciones de metales pesados, particularmente Pb y Cr son extremadamente elevados ( $70.66$  y  $62 \mu\text{g/g}^{-}$ , respectivamente). Villanueva y Botello (1998) realizaron una recopilación de los trabajos en Tampamachoco y reportan que la concentración promedio de metales en el sedimento fue de (mayor a menor concentración): Cd ( $2.06 \pm 1.2 \mu\text{g/g}$ ) > Pb ( $1.86 \pm 0.95 \mu\text{g/g}$ ) > Cr ( $0.89 \pm 0.59 \mu\text{g/g}$ ) (Sobrino *et al.*, 2005). En un trabajo previo, se registraron niveles máximos de cadmio, cromo y plomo en sedimentos de 2.2, 34.69 y 44.14  $\mu\text{g/g}$  respectivamente (Botello *et al.*, 1995; Sobrino *et al.*, 2005). Posteriormente, en esta misma se observaron sedimentos con actividad genotóxica en la localidad cercana a la termoeléctrica (La Paloma) y las ubicadas al Oeste (Paso Daniel) y en la Porción Norte de este sistema (Dos Bocas) (Sobrino *et al.*, 2005).

En relación a los contenidos de metales pesados en la biota, se han realizado algunos estudios en la zona costera del Golfo de México. Vázquez *et al.* (2001) realizaron estudios de

metales (Cu, Pb, Cd, Cr, Mn, Zn, Ag, Ba y Fe) en peces y camarones colectados en diferentes áreas de la Sonda de Campeche, donde muestran que la concentración de dichos metales en los músculos, gónadas y vísceras (Cu: 1.3-10.5, Pb: 0.15- 8.5, Cd:0.001-4.88, Cr: 1.3-9.8, Mn:0.1-0.6, Zn: 41-202, Ag: 0.002-1.5, Ba: 9.3-55.7, Fe: 8.5-236 mg/kg) no presentan variaciones en función del área de colecta, con excepción del Ba y el Zn. Estos metales mostraron las concentraciones más altas en los músculos y gónadas de organismos colectados dentro del área de circulación restringida, adyacente a las plataformas.

Particularmente Pérez-Zapata *et al.* (1984) analizaron los ejemplares de peces de *Centropomus undecimalis* y *Eugerres* sp., reportando que los valores más altos de Pb para estos organismos fueron cráneo y riñón con 50.00  $\mu\text{g/g}^{-1}$  respectivamente. A pesar que el estado de Veracruz es altamente industrializado y urbanizado, las concentraciones promedio de Pb en *Crassostrea virgínica* (4.38  $\mu\text{g/g}^{-1}$ ), son semejantes a las del estado de Campeche (4.59  $\mu\text{g g}^{-1}$ ); y a la vez son menores a las registradas para el estado de Tamaulipas (5.85  $\mu\text{g g}^{-1}$ ).

Botello (1996) realizó un estudio en la laguna El Yucateco, Tabasco de metales en distintas especies de peces y reportó que las concentraciones de Pb para *Cichlasoma friedrichthali* fueron las más altas reportadas para peces registrando 15.68  $\mu\text{g g}^{-1}$ , así como para cuatro especies más, estando por arriba del límite máximo permisible (2.50  $\mu\text{g g}^{-1}$ ) para consumo de alimentos acuáticos (Nauen, 1983).

Villanueva y Botello (2005) reportan para *E. plumieri* en Costa de la Laguna Bat. No. 3El Yucateco, Tabasco, 2.86  $\mu\text{g g}^{-1}$  de Cd, < 0.05  $\mu\text{g g}^{-1}$  de Cr y 0.37  $\mu\text{g g}^{-1}$  de Pb, en la Bat. No. 4, 2.00  $\mu\text{g g}^{-1}$  de Cd, 0.07  $\mu\text{g g}^{-1}$  de Cr, y 4.82  $\mu\text{g g}^{-1}$  de Pb; en la entrada río Chicozapote, 1.03  $\mu\text{g g}^{-1}$  de Cd, <0.05  $\mu\text{g g}^{-1}$  de Cr y 2.7  $\mu\text{g g}^{-1}$  de Pb.

Los peces son bioindicadores ideales de la contaminación con metales pesados en los sistemas acuáticos, ya que se encuentran en los diferentes niveles tróficos en el ecosistema acuático y responden a la contaminación del medio acuático a través de cambios de las condiciones de salud. En este estudio se consideró a *E. plumieri* (mojarra) por su tamaño, estructura, edad y la abundancia en la zona de estudio (Figura 2). *Eugerres plumieri* (Cuvier,

1830) se incluye en la familia *Gerreidae*, orden Perciformes, clase Actinopteri. Se caracteriza por alcanzar una longitud total de 40.0 cm (macho/no sexado; peso máximo de 1,020 g). El ambiente en que habita es demersal; de agua dulce, salobre; marino, en clima subtropical; 34° N, en el fondo de los manglares-rayado arroyos y lagunas a menudo entrando en una distancia considerable en las aguas dulces. Se alimenta de insectos acuáticos, crustáceos, bivalvos microorganismos y detritus. El tiempo de duplicación de la población es de 1,4 a 4,4 años. Geográficamente se distribuye en el Atlántico occidental. Se comercializa en fresco, o se transforma en harina de pescado. Su importancia en pesquerías es escasa, es utilizado en la pesca deportiva.



Figura 2. *Eugerres plumieri* (Cuvier, 1830) de la Laguna de Tampamachoco, Veracruz.

## VI. JUSTIFICACIÓN

La Laguna de Tampamachoco, Veracruz forma parte del Sitio Ramsar No.1602: “Manglares y Humedales de Tuxpan”, Veracruz, México, está considerada como el último reservorio de vegetación costera original del municipio de Tuxpan, tiene importancia pesquera especialmente como área ostrícola y como hábitat específico de ciertas especies que penetran a cumplir parte de su ciclo de vida. Una gran variedad de aves se encuentran reportadas para el sitio. Estos humedales revisten un importante hábitat para muchas especies de estuario y marinas. La Laguna de Tampamachoco representa también una de las lagunas más ricas en especies de peces, de las cuales están reportadas aproximadamente 179, 66 de moluscos, 14 de crustáceos y 53 de otros organismos. A pesar de su importancia económica, biológica y política a nivel local, estatal y nacional, no se cuenta con información reciente sobre la calidad ambiental de la laguna, es por ello que este estudio reviste importancia debido a que reporta la situación actual del comportamiento hidrológico de la laguna, así como la presencia y concentración de algunos metales pesados en agua y ejemplares de *Eugeres plumieri* presentes en dicha laguna.

## VII.- OBJETIVOS

### VII.1 Objetivo General

Analizar la concentración de seis metales pesados (Pb, Cr, Cd, Cu, Ba y Hg) de interés toxicológico en agua, así como en tejidos y órganos de *Eugerres plumieri* (mojarra) de la Laguna de Tampamachoco, Veracruz para determinar su cinética ambiental, biodisponibilidad y toxicocinética.

### VII.2 Objetivos Particulares

- a) Identificar y evaluar variables fisicoquímicas (temperatura, pH, oxígeno disuelto, porcentaje de saturación de oxígeno disuelto, salinidad, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales y transparencia) del agua de la Laguna de Tampamachoco, Veracruz que puedan afectar la calidad del agua, la cinética ambiental y biodisponibilidad de metales pesados.
- b) Evaluar la distribución espacio-temporal de seis metales pesados en la Laguna de Tampamachoco, Veracruz, para determinar su presencia y cinética ambiental a través de espectrofotometría de absorción atómica
- c) Evaluar la concentración de seis metales pesados en músculo, piel, branquias e hígado de *E. plumieri* de la Laguna de Tampamachoco, Veracruz para determinar su toxicocinética a través de espectrofotometría de absorción atómica.

## VIII. METODOLOGÍA

### VIII.1 Área de estudio

La zona de estudio se ubica en la llanura costera norte del estado de Veracruz, a 9 km al noroeste de la ciudad de Tuxpan. Se ubica entre los paralelos 20° 58' a 21° 05' de latitud Norte y los meridianos 97° 20' a 97° 24' de longitud Oeste. La laguna ocupa un área de 1,500ha. Para la caracterización fisicoquímica de la laguna y la determinación de metales pesados, se realizó una prospección del área de estudio donde se establecieron sitios de muestreo para el periodo de enero 2009 a febrero de 2010. Los muestreos se realizaron mensualmente y en cada uno de ellos se registraron datos de variables fisicoquímicas (temperatura, pH, oxígeno disuelto, % de saturación de oxígeno, salinidad, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos y transparencia) *in situ*, utilizando un multiparámetro Marca Hanna HI 9128 previamente calibrado antes de cada muestreo y transparencia (cm) con el disco de Secchi. Para la determinación de metales pesados, se colectaron muestras de agua y ejemplares de *E. plumieri* capturados el mismo día del muestreo.

### VIII.2 Sitios de muestreo

Se realizó una prospección del área de estudio y se seleccionaron cuatro sitios para el muestreo con base en las características particulares de cada uno de ellos: sitio 1 (La Mata) se encuentra al sur, en el punto de confluencia entre el agua de la laguna, del río y del mar, además de asentamientos humanos de las comunidades de la Mata, Tampamachoco y el Hospital del IMSS, sitio 2 (Isla Potreros), donde no hay asentamientos humanos, sitio 3 (CFE) el cual se encuentra enfrente de la Central Termoeléctrica Adolfo López Mateos y sitio 4 (Pipiloya) al norte, donde inician los canales de navegación que comunican a la laguna con el mar (nuevo) y con la laguna de Tamiahua (viejo). Considerando que la laguna es somera y que alcanza profundidades de 30 cm. en época de sequía, los sitios se seleccionaron por el canal de navegación, para que siempre se tuviera acceso a los mismos, se consideró el largo de la laguna de sur a norte (Figura 2).

### VIII.3 Periodo de muestreo

Se realizaron muestreos mensuales de enero 2009 a febrero 2010, de 10:00 a 14:00, iniciando siempre por el sitio 1, terminando en sitio 4. No hubo variaciones en los muestreos entre las épocas climáticas propias de la región.

### VIII.4 Muestreo de agua

El muestreo de agua para la determinación de metales pesados, se realizó en frascos de polipropileno de 1 litro, lavados previamente con agua y después con una mezcla de agua: HNO<sub>3</sub> (1:1) y enjuagados con agua destilada. Antes de tomar la muestra se enjuagaron tres veces con agua del sitio. Las muestras se tomaron directamente sumergiendo el frasco a una profundidad de 50 cm. Se ajustó el pH a 2 con ácido nítrico concentrado, se taparon y conservaron a 4°C hasta su análisis. Se tomaron muestras simples de agua en cada uno de los sitios, cada muestra se etiquetó con el nombre del muestreador, fecha, hora, lugar de muestreo, nombre de la muestra y la determinación analítica a realizar. El volumen de las muestras tomadas, el tipo de recipiente utilizado y la preservación de las mismas se realizaron de acuerdo a los lineamientos establecidos por la NMX-AA-003-1980

### VIII.5 Muestreo de peces

Los ejemplares de *E. plumieri* fueron capturados durante cada uno de los muestreos con artes de pesca artesanal por los miembros de las cooperativas locales, en los sitios establecidos de la laguna para el estudio. Se consideraron todos los peces colectados, sin importar el tamaño y el sexo de los ejemplares. Se colocaron en bolsas de plástico y se transportaron en hielo hasta el laboratorio para su procesamiento y conservación. Los peces fueron pesados (gr) y medidos (cm) antes de su disección, se lavaron con agua desionizada, se removió las escamas, se separó la piel, músculo, hígado y branquias. Posteriormente, todos los tejidos y órganos se sometieron a proceso de secado en una estufa eléctrica a 80°C durante una semana hasta alcanzar el peso constante.

### VIII.6 Medición de variables fisicoquímicas

Las variables fisicoquímicas registradas en cada sitio de muestreo (temperatura, pH, oxígeno disuelto, porcentaje de saturación de oxígeno disuelto, salinidad, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos y transparencia) se realizaron *in situ* a una profundidad de 50cm, con una sonda multiparámetros marca Hanna HI9828, calibrado antes del muestreo. Para la Temperatura, la sonda fue calibrada en rangos de 5°C. Para el pH se utilizaron amortiguadores de valores 4, 7 y 10 para la calibración en tres puntos. Para la conductividad se utilizó un estándar de 12850  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Se hicieron las lecturas por triplicado y obteniendo un promedio de ellas. La transparencia se midió con un disco de Secchi.

### VIII.7 Análisis de metales pesados (Pb, Cr, Cd, Cu, Ba y Hg)

Para la determinación de metales pesados en agua, las muestras acidificadas previamente con ácido nítrico concentrado (Merck) a un pH de 2 durante el muestreo, se homogenizaron y se depositaron 100 ml de cada una de ellas en vasos de precipitado, con tres repeticiones por muestra. Para el control de calidad de los análisis se introdujo dos blancos de 100 ml de solución de ácido nítrico al 5% con salinidad de 30 ups, preparada con agua desionizada. A una muestra y un blanco se les adicionó 500  $\mu\text{l}$  de multielemento IPC Analytic Mixtrure 5 High Purity Std como referencia.

A las cinco muestras se les adicionó 20 ml de ácido nítrico concentrado (Merck), se colocaron en una parrilla eléctrica hasta alcanzar la mitad del volumen, se filtraron en papel whatman # 40 para eliminar los sólidos suspendidos que pudieran afectar el equipo de espectrofotometría de absorción atómica.

Se aforaron a 50 ml con ácido nítrico al 5% y se vertieron en frascos limpios previamente lavados con ácido nítrico. Para evitar contaminación de las muestras durante la manipulación y el almacenamiento, la cristalería y demás utensilios de plástico fueron lavados previamente con ácido nítrico al 5%.

Para la determinación de metales pesados en tejidos y órganos, las muestras secas a peso constante, se molieron finamente en un mortero de porcelana en el cual se homogenizaron y se sometieron a digestión con ácido nítrico concentrado (Merck) para la extracción de los metales pesados. La digestión se realizó con 1.0g de tejido u órgano (músculo, piel, branquias e hígado) y 10 ml ácido nítrico concentrado.

Se prepararon 3 muestras de tejido, a una de ellas se le adicionó (500 µl) del multielemento IPC Analytic Mixtrure 5 High Purity Std., como referencia, un blanco de 20 ml de HNO<sub>3</sub> concentrado, y un blanco referenciado 20 ml de HNO<sub>3</sub> concentrado y 500 µl de estándar multielemento. La digestión se realizó en un equipo microkjeldalh evitando la ebullición, hasta que se obtuvo una solución cristalina, se filtró en papel whatman # 40 con el fin de quitarles cualquier tipo de residuo. Posteriormente se depositaron en matraces y aforaron a 50 ml con ácido nítrico al 5% preparado con agua desionizada.

Las muestras digeridas fueron almacenadas en refrigeración a 4°C en recipientes de polipropileno para su posterior análisis. Las lecturas en el equipo de absorción atómica se realizaron mensualmente. Todos los reactivos utilizados fueron grado analítico y el agua desionizada. El reactivo estándar de referencia, que también fue usado para hacer las curvas de calibración es certificado (IPC Analytic Mixtrure 5 High Purity Std.).

Para la determinación de Hg se utilizó el generador de hidruros. El mercurio iónico se reduce fácilmente a su forma elemental bajo condiciones reductoras, esto ocurre en presencia de un reductor como el borohidruro de sodio o el cloruro estanoso en un medio ácido. La preparación de los estándares para la curva de calibración y las muestras siguen el mismo procedimiento. El Hg se lee sin utilizar la flama ya que el hidruro de mercurio es explosivo. Reportar el contenido de mercurio soluble en mg/L, obtenido directamente de la curva de calibración (si la muestra se diluyó, multiplicar por el factor de dilución)

La determinación de la concentración de metales pesados en muestras de agua y de tejidos se analizaron en un espectrofotómetro de absorción atómica marca GBC HG3000 Avanta, con flama de aire-acetileno.

## VIII.8 Análisis estadístico

Con el programa estadístico de Statgraphics Plus V.5.1, se realizaron análisis de varianza, para verificar el comportamiento fisicoquímico de la laguna, establecer la correlación de las variables fisicoquímicas y la concentración de los metales pesados en agua y los tejidos. Así como una comparación del comportamiento de los metales pesados en el agua entre los diferentes sitios muestreados y los diferentes tejidos analizados.

Se llevó a cabo un análisis no paramétrico, de Componentes Principales con el programa NTSYS-pc Numerical Taxonomy and Multivariate Analysis System versión 2.02i para establecer la correlación entre la concentración de los metales pesados y las variables fisicoquímicas.

## IX- RESULTADOS

### IX.1 Caracterización fisicoquímica de la Laguna de Tampamachoco, Veracruz

Las principales características de la laguna de Tampamachoco, Veracruz se muestran en el (Cuadro 1)

#### IX.1.1 Parámetros físico-químicos

Se realizaron mediciones de temperatura (°C), pH, oxígeno disuelto (mg/L), porcentaje de saturación de oxígeno, salinidad (ups), conductividad eléctrica, (mS/cm) sólidos totales disueltos (ppt) y transparencia (cm) en cada uno de los sitios de muestreo, estas mediciones se realizaron *in situ*. Los valores encontrados se muestran en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Valores mínimo, máximo y promedio anual (Enero 2009-Febrero 2010) para los factores físico-químicos evaluados de la laguna de Tampamachoco, Veracruz

Parámetro	Valor Mínimo	Valor Máximo	$\bar{X}$ Anual $\pm$	S
Temperatura (°C)	16.9	31.5	25.2	$\pm 3.5037$
pH	6.3	8.1	7.46	$\pm 0.4921$
Oxígeno disuelto (O. D). (mg/L)	1.1	7.18	5.2	$\pm 0.9793$
Saturación Oxígeno (%)	11.4	100.04	72.96	$\pm 13.9227$
Salinidad (ups)	5.45	35.72	27.49	$\pm 7.8730$
C.E. (mS/cm)	1.93	53.9	41.95	$\pm 13.0548$
TDS (ppt)	4.87	33.1	21.7	$\pm 6.2158$
Transparencia (cm)	20	104	51.48	$\pm 18.4676$

### IX.1.1.1 Temperatura del agua

Los resultados de la ANOVA muestran que a temperatura del agua no presentó variaciones significativas entre los cuatro sitios muestreados ( $p>0.05$ ), registró fluctuaciones moderadas durante el todo el periodo de muestreo, la mínima fue de 16.9°C en febrero del 2010 (en la temporada de nortes) en el sitio CFE y la máxima de 31.5°C, en junio (en la temporada de lluvias) en el sitio Pipiloya, con un promedio anual de 25.2°C para toda el área de estudio. En el sitio La Mata se registraron los valores más bajos durante el periodo de muestreo, incrementándose en la parte interna de la laguna (Cuadro 1 y Figura 3).

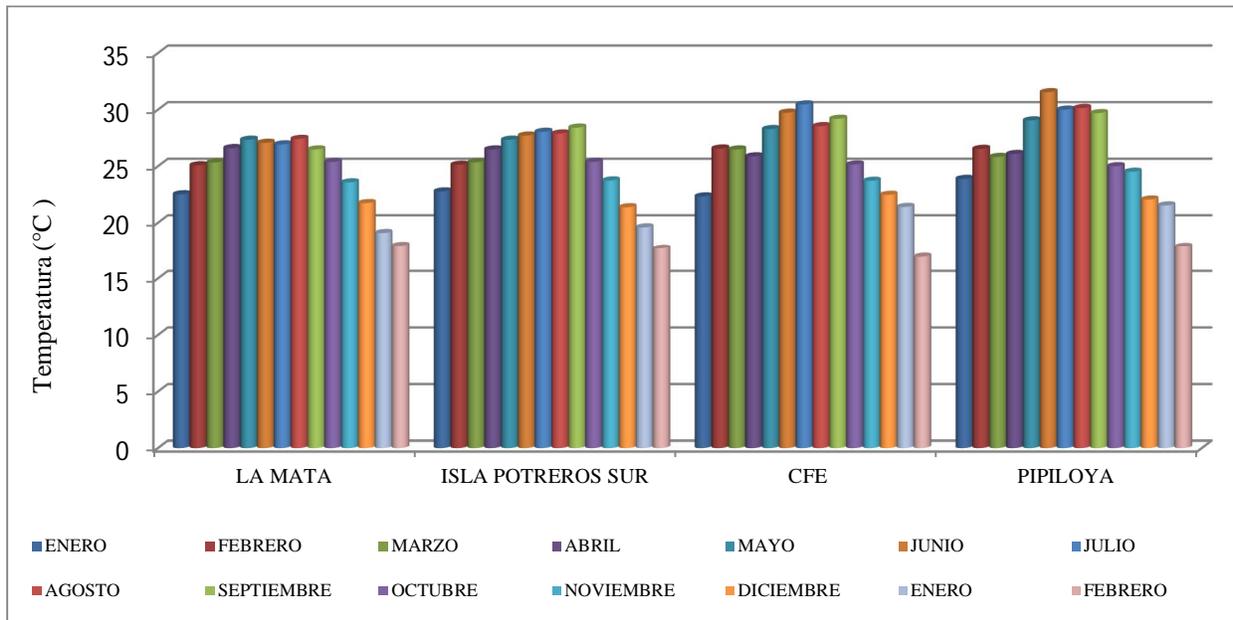


Figura 3. Fluctuación mensual de la temperatura del agua (°C) (Enero 2009 -Febrero 2010) de cuatro sitios de la Laguna de Tampamachoco, Veracruz.

### IX.1.1.2 Potencial de hidrógeno (pH)

Los resultados del ANOVA muestran que los valores de pH no presentaron variaciones significativas ( $p > 0.05$ ) durante el periodo de muestreo en los cuatro sitios, fluctuando de 6.3 en mayo (en la temporada de secas) a 8.1 en febrero 2009 (en la temporada de nortes), ambos en el sitio 1, con un promedio anual de 7.4. (Cuadro 1 y Figura 4).

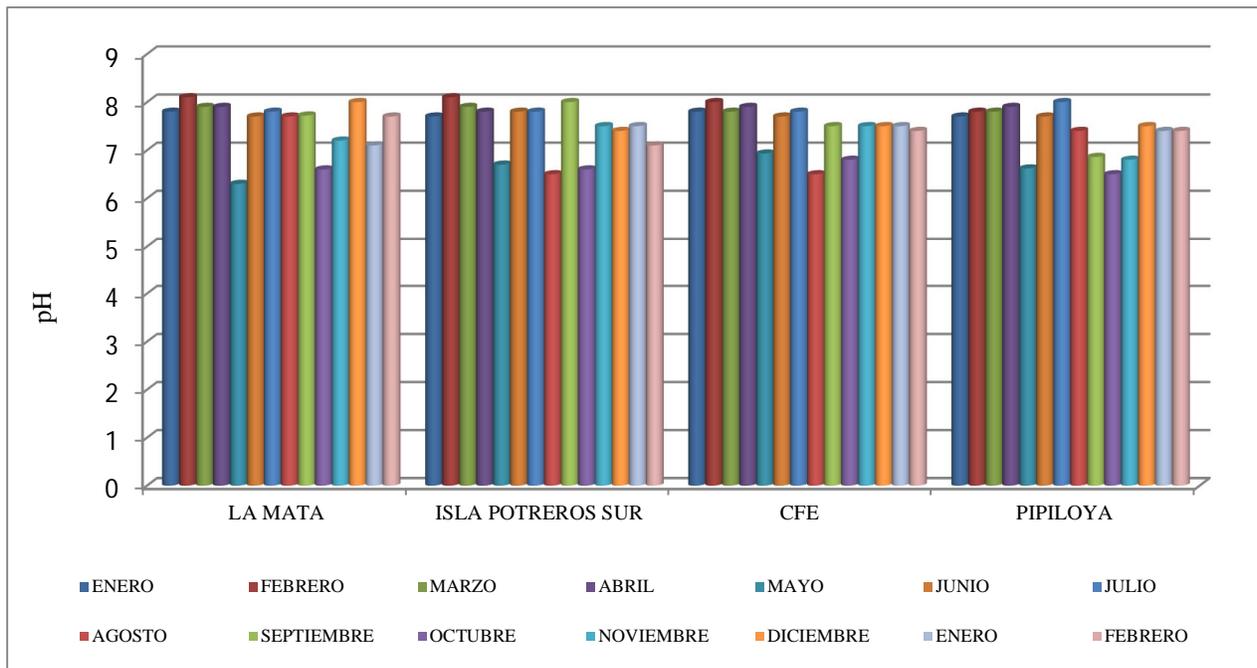


Figura 4. Fluctuación mensual de pH (Enero 2009 - Febrero 2010) en cuatro sitios de la Laguna de Tampamachoco, Veracruz.

### IX.1.1.3 Oxígeno disuelto

Los resultados de la ANOVA indican que los valores de oxígeno disuelto no registraron variaciones significativas ( $p > 0.05$ ) entre los cuatro sitios muestreados, sus valores fluctuaron entre 1.1 mg/L en septiembre (temporada de lluvias) y 7.18 mg/L en enero de 2009 (temporada de nortes), ambos en el sitio Pipiloya dando un promedio anual de 5.2 mg/L (Cuadro 1 y Figura 5).

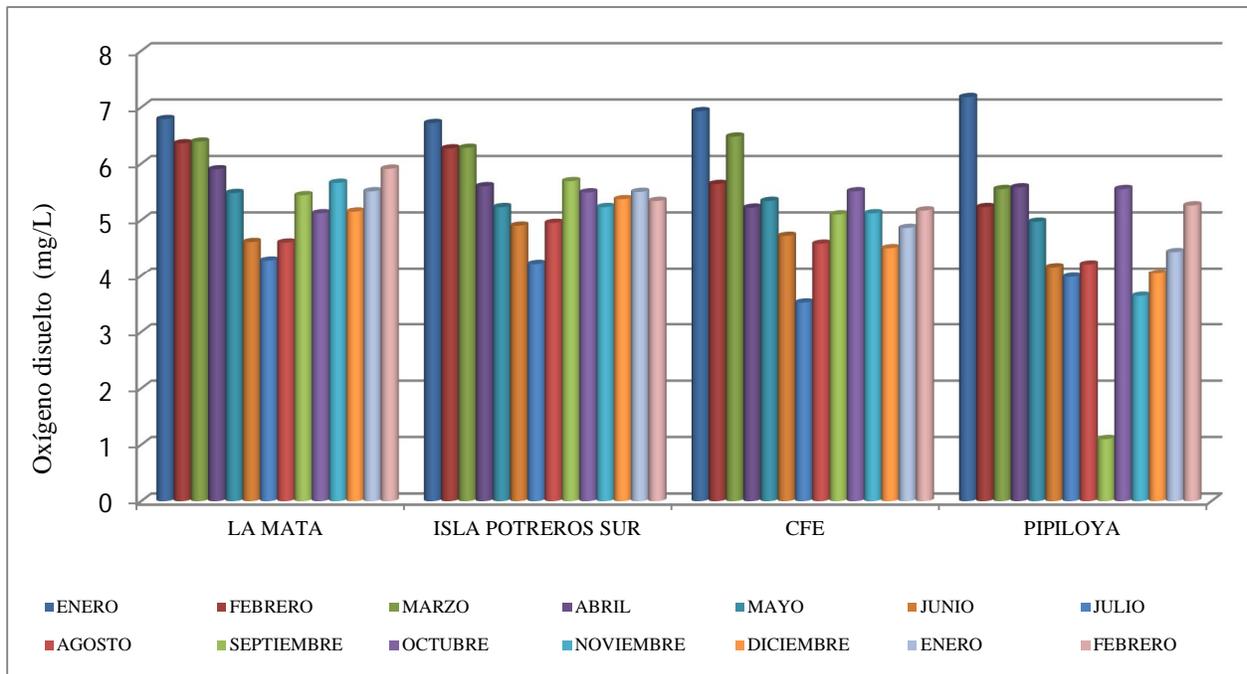


Figura 5. Fluctuación mensual de oxígeno disuelto (mg/L) (Enero 2009- Febrero 2010) en cuatro sitios de la Laguna de Tampamachoco, Veracruz.

#### IX.1.1.4 Porcentaje de Saturación de oxígeno disuelto

Los resultados de la ANOVA muestran que los valores de porcentaje de saturación de oxígeno no presentaron variaciones significativas ( $p > 0.05$ ) entre los cuatro sitios de muestreo, se registró el valor más bajo en septiembre con 11.4% (temporada de lluvias) y el más alto en enero del 2009 con 100.0% (temporada de nortes), ambas en el sitio Pipiloya con un promedio anual de 72.9% (Cuadro 1 y Figura 6).

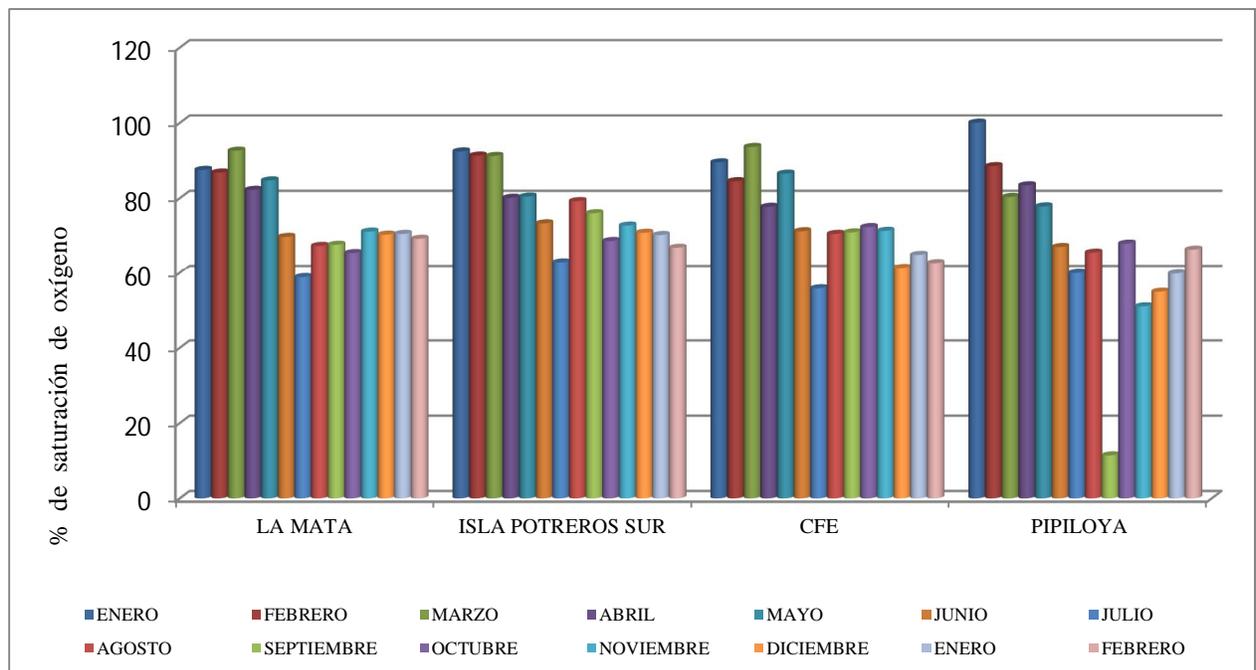


Figura 6. Fluctuación mensual de porcentaje de saturación de oxígeno disuelto (Enero 2009 - Febrero 2010) en cuatro sitios de la laguna de Tampamachoco, Veracruz.

### IX.1.1.5 Salinidad

Se acuerdo a los resultados de la ANOVA, la salinidad no presenta variaciones significativas entre los cuatro sitios muestreados ( $p>0.05$ ), fluctuó de 5.45 ups en el mes de septiembre (temporada de lluvias) en el sitio La Mata, donde confluye la entrada de agua del río, a 35.72 ups en abril (temporada de secas) en el sitio Pipiloya, es el sitio más interno de la laguna, con un promedio anual de 27.49 ups (Cuadro 1 y Figura 7).

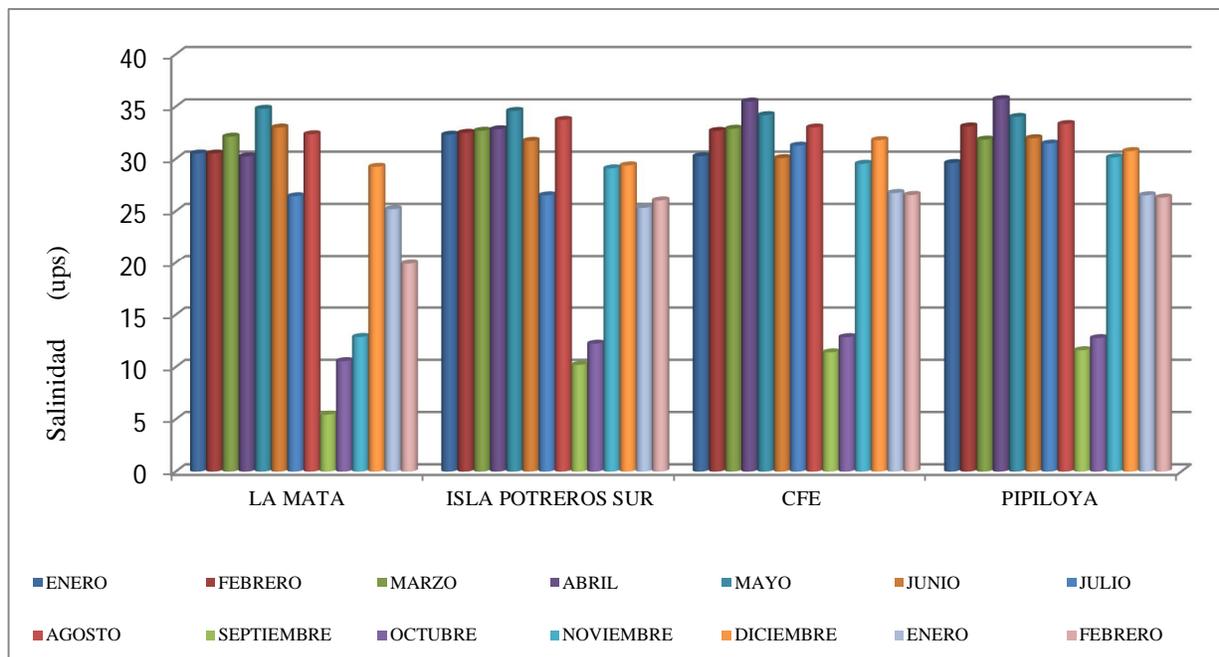


Figura 7. Fluctuación mensual de salinidad (ups) (Enero 2009- Febrero 2010) en cuatro sitios de la Laguna de Tampamachoco, Veracruz.

### IX.1.1.6 Conductividad eléctrica

De acuerdo a los resultados de la ANOVA, los valores de conductividad eléctrica no presentaron variación significativa ( $p > 0.5$ ) entre los cuatro sitios muestreados. El registro más bajo fue de 1.93 mS/cm en septiembre en (la temporada de lluvias) en los sitios CFE y Pipiloysa y el valor más alto fue de 53.9 mS/cm en abril (época de secas) en Pipiloysa, con un promedio anual de 41.9 mS/cm (Cuadro 1 y Figura 8).

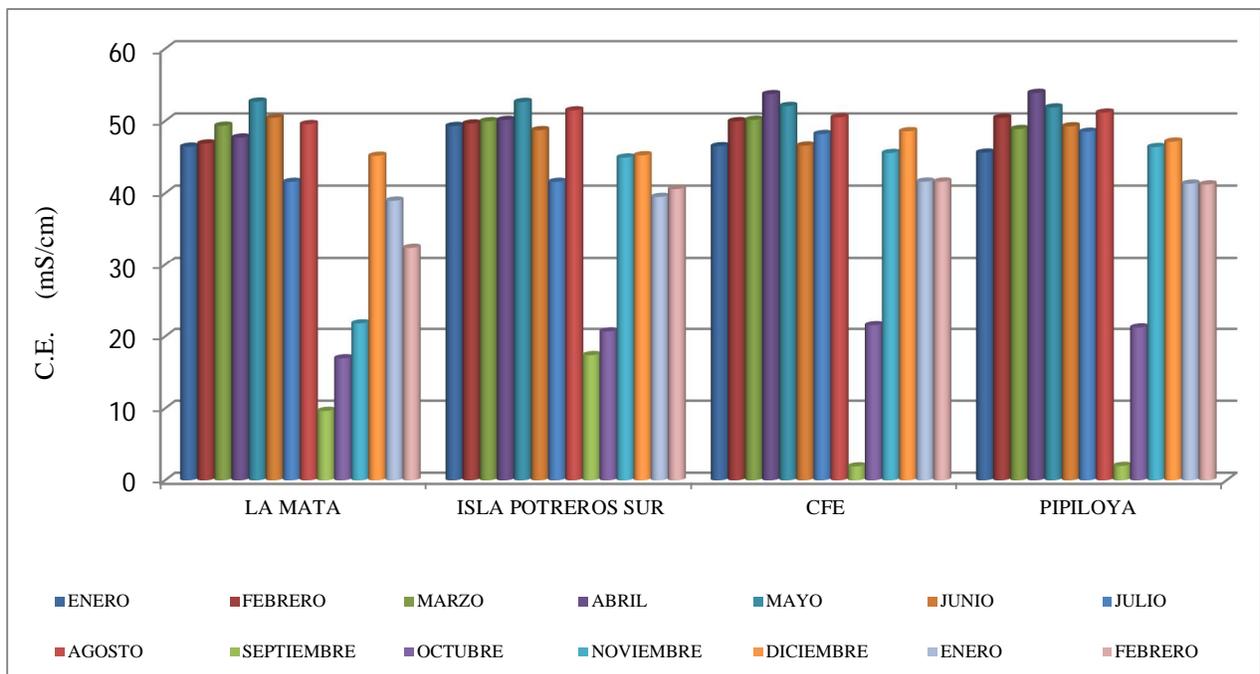


Figura 8. Fluctuación mensual de conductividad eléctrica (mS/cm) (Enero 2009 –Febrero 2010) en cuatro sitios de la laguna de Tampamachoco, Veracruz.

### IX.1.1.7 Sólidos totales disueltos

Los resultados de la ANOVA muestran que los sólidos totales disueltos no registraron variaciones significativas ( $p > 0.05$ ) entre los cuatro sitios muestreados, presentaron el valor más bajo de 4.8 ppt en septiembre (temporada de lluvias) en el sitio La Mata. El valor más alto de 33.1 ppt en sitio Pipiloya en febrero del 2009 (temporada de nortes) (Cuadro 1 y Figura 9).

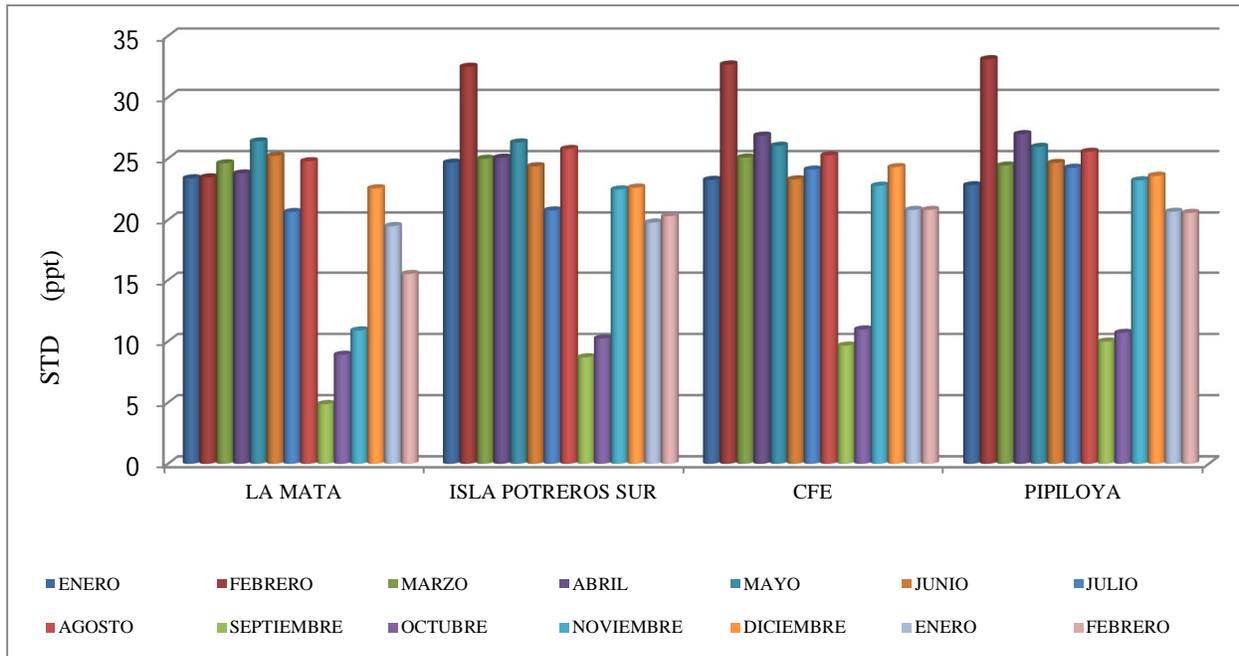


Figura 9. Fluctuación mensual de sólidos disueltos totales ( ppt) (Enero 2009 - Febrero 2010) en cuatro sitios de la laguna de Tampamachoco, Veracruz .

### IX.1.1.8 Transparencia

Los resultados de la ANOVA indican que la transparencia no registró variaciones significativas ( $p > 0.05$ ) entre los cuatro sitios muestreados, fluctuó de 20 cm en septiembre (temporada de lluvias), cuando hubo grandes aportes de material terrígeno a consecuencia de intensas lluvias, a 104 cm en junio, ambas en el sitio La Mata, con un promedio anual de 51.48 cm. (Cuadro 1 y Figura 10).

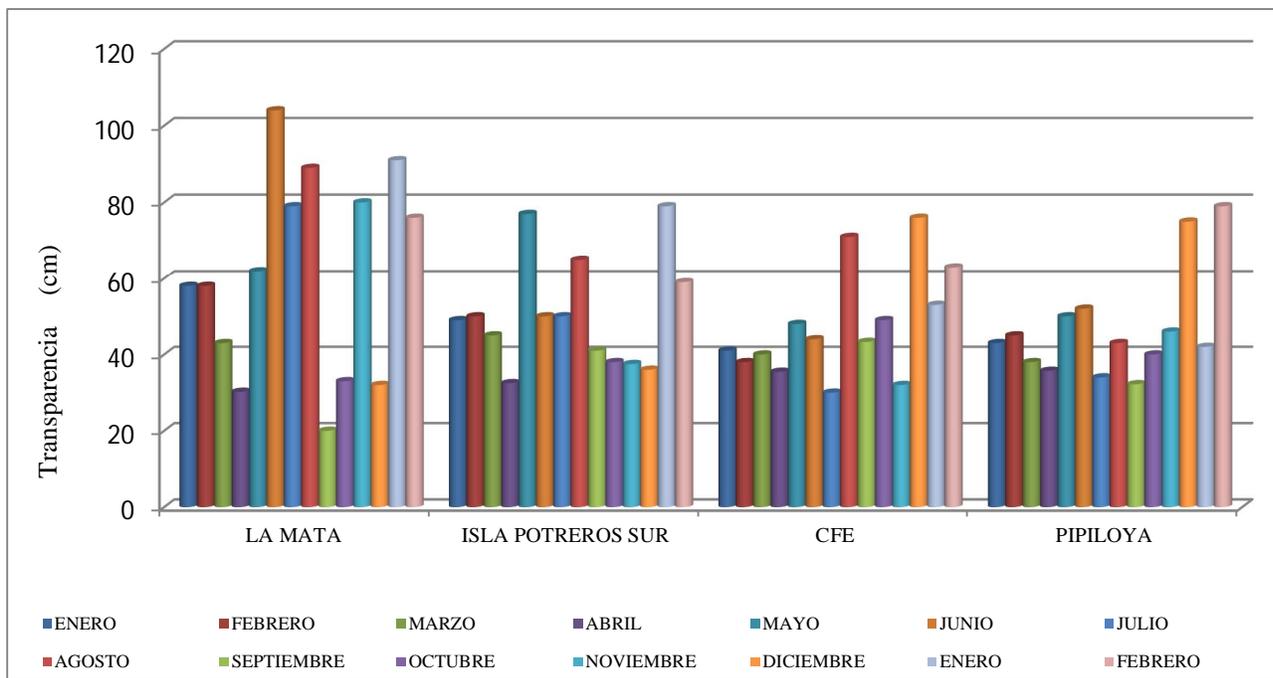


Figura 10. Fluctuación mensual de transparencia (cm) (Enero 2009- Febrero 2010) en cuatro sitios de la laguna de Tampamachoco, Veracruz.

## IX.2 Metales pesados

Las concentraciones de los metales Pb, Cr, Cd, Cu, Ba y Hg se midieron en agua y en tejidos y órganos (músculo, piel, branquias e hígado) de *E. plumieri*.

### IX.2.1 Metales pesados en agua

En el agua de la laguna de Tampamachoco solo se detectaron tres de los seis metales pesados analizados, cromo, bario y cobre. Los valores de plomo, cadmio y mercurio estuvieron por debajo del límite de detección del equipo, 0.06 mg/L, 0.009 mg/L y 1.6 mg/L respectivamente (Cuadro 2).

Cuadro 2. Concentración mínima, máxima y promedio anual (Enero 2009 -Febrero 2010) de metales pesados en agua de cuatro sitios de la laguna de Tampamachoco, Veracruz.

Metal	L.D. mg/L	La Mata Min - Máx $\bar{X}$	Isla Potreros Min - Máx $\bar{X}$	CFE Min - Máx $\bar{X}$	Pipiloya Min - Máx $\bar{X}$
Pb	0.06	ND	ND	ND	ND
Cr	0.05	0.063 - 0.82 0.2055 ±0.3016	0.055-0.105 0.0755 ±0.0163	0.05-0.101 0.042 ±0.0181	0.055-0.097 0.0.3062 ±0.3735
Cd	0.009	ND	ND	ND	ND
Cu	0.025	0.033-0.23 0.1074 ±0.0924	0.19-0.31 0.25 ±0.0848	0.034-0.1434 0.4672 ±0.06578	0.025
Ba	0.18	0.21	0.198	0.186-0.226 0.206 ±0.0282	0.194-0.224 0.209 ±0.0212
Hg	1.6	< L.D	< L.D	< L.D	< L.D.

L.D.=Límite de Detección, L.M.P= Límite Máximo Permitido,

L.M.P (SEDUE, 1990) (Pb=0.006 mg/L, Cr= 0.05 mg/L, Cd= 0.05 mg/L; Hg = 1.0 mg/L)

L.M.P NOM-001-ECOL- 1996 (Cu = 5 mg/L)

L.M.P CECA (SEDUE, 1989) (Cu = 0.003 mg/L, Ba= 0.5 mg/L)

L.M.P NOM-001-SEMARNAT-1996( Pb= 0.2 mg/L, Cr = 0.5 mg/L, Cd = 0.1 mg/L, Cu = 4 mg/L, Hg = 1.0 mg/L)

### IX.2.1.1 Cromo.

Este elemento registró valores promedio anual de 0.2055 mg/L en La Mata, 0.0755 mg/L en Isla Potrereros, 0.0654 mg/L en CFE y 0.0362 mg/L en Pipiloya. Los valores más altos se registraron en mayo, 0.1170 mg/L en el sitio La Mata, 0.1050 mg/L en Isla Potrereros, 0.1010 mg/L en CFE y 0.1080 mg/L en Pipiloya. De septiembre a febrero 2010 no se detectó. La mayor concentración se registró en La Mata y la menor en Pipiloya (Cuadro 2, Figura 11).

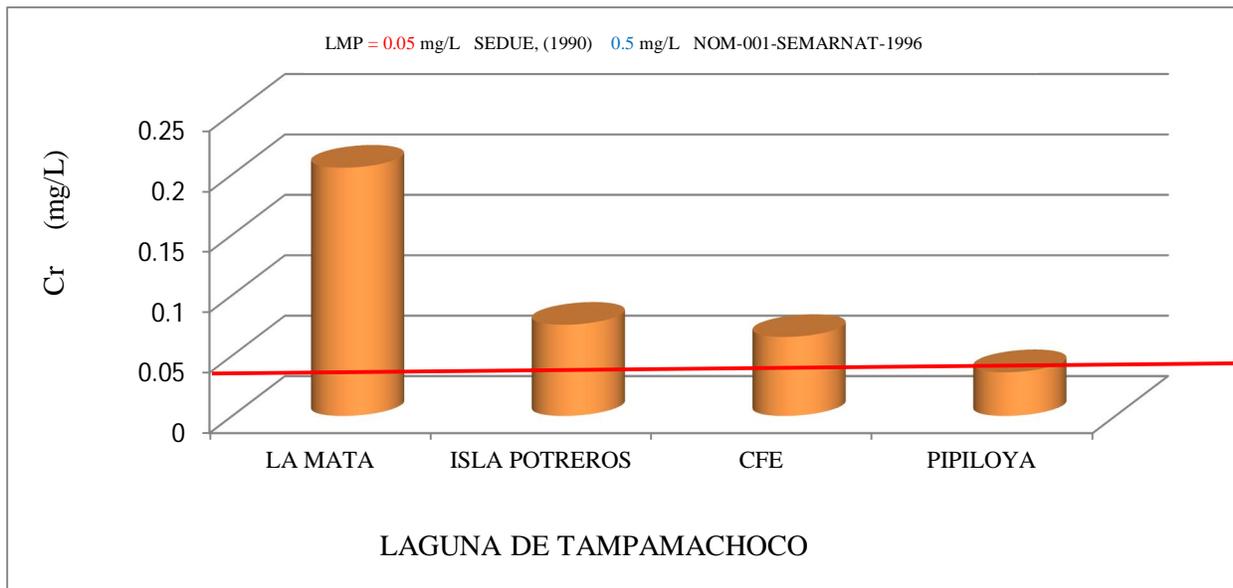


Figura 11. Concentración promedio anual (Enero 2009- Febrero 2010) de Cr (mg/L) en agua de la Laguna de Tampamachoco, Veracruz.

### IX.2.1.2 Cobre.

En agua se detectó durante enero, abril, junio, octubre, noviembre y diciembre 2009, registrando concentraciones promedio en La Mata de 0.1074 mg/L, en Isla Potrerros de 0.25 mg/L, en CFE 0.4672 mg/L y en Pipiloya 0.025 mg/L. El sitio CFE registró la mayor concentración de Cu y Pipiloya la menor (Cuadro 2, Figura 12).

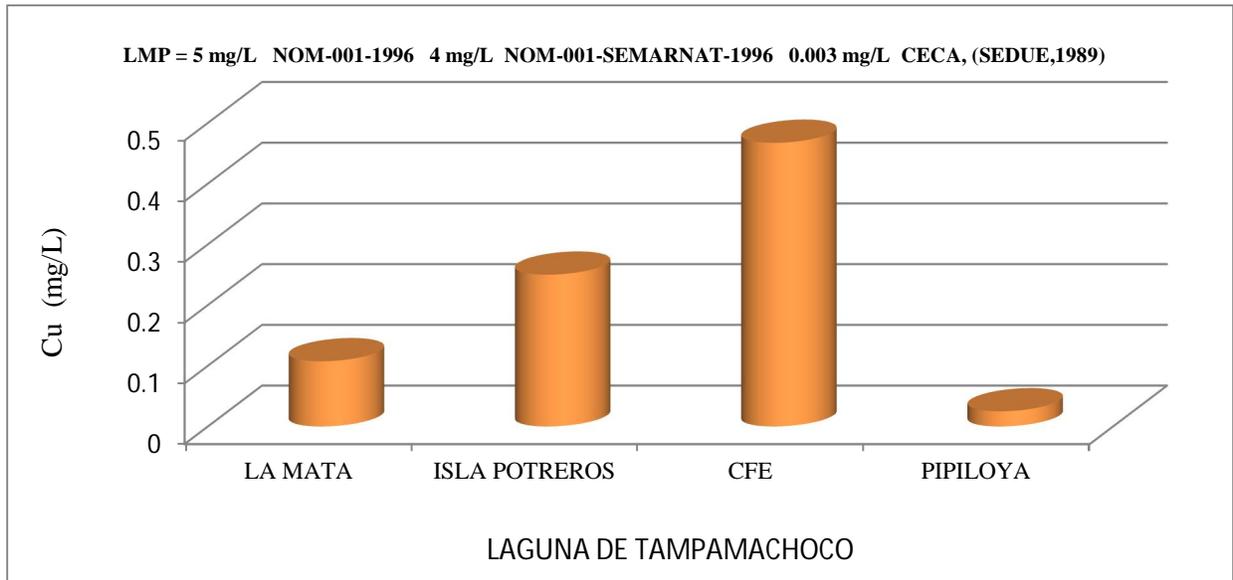


Figura 12. Concentración promedio anual (Enero 2009- Febrero 2010) de Cu (mg/L) en agua de la Laguna de Tampamachoco, Veracruz.

### IX.2.1.3 Bario.

Este metal solo se detectó de noviembre a enero 2010, registrando un promedio anual de 0.21 mg/L en La Mata, 0.198 mg/L en Isla Potreros, 0.206 mg/L en CFE y 0.20 mg/L en Pipiloja. En La Mata se registró la mayor concentración de Ba y en Isla Potreros la menor (Cuadro 2, Figura 13).

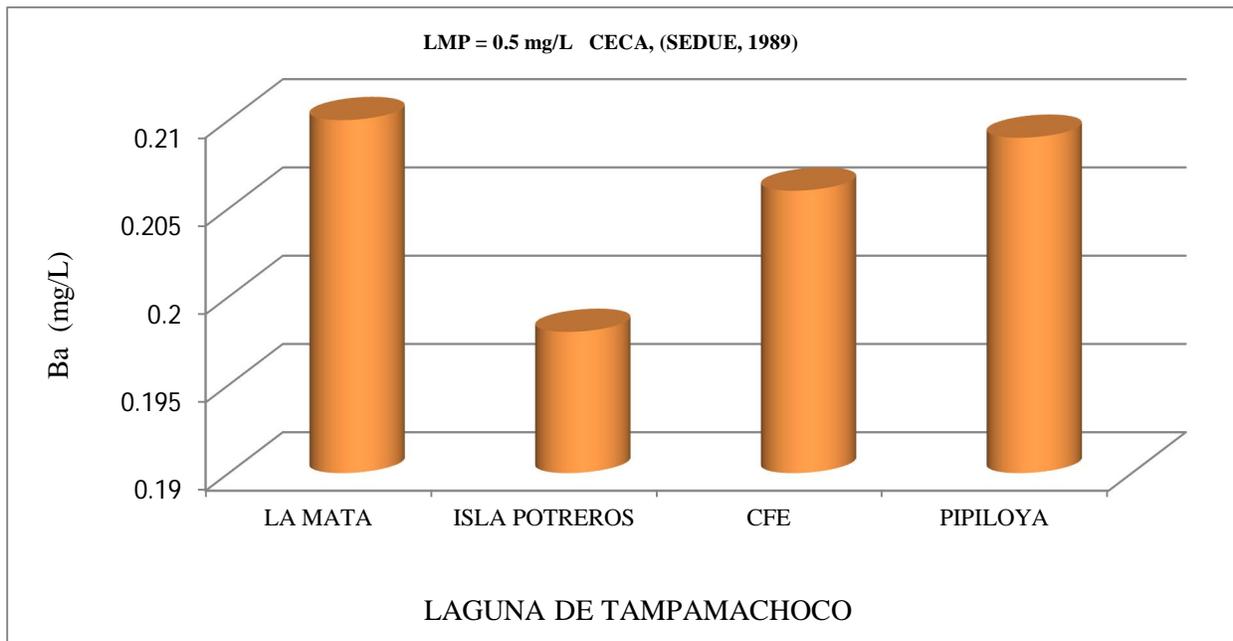


Figura 13. Concentración promedio anual (Enero 2009 - Febrero 2010) de Ba en la Laguna de Tampamachoco, Veracruz.

## IX.2.2 Metales pesados en *Eugerres plumieri*

En los análisis de tejidos y órganos de *E. plumieri* de la laguna de Tampamachoco se detectaron cinco de los seis metales pesados Pb, Cr, Cd, Cu y Ba. La concentración de Hg está por debajo del límite de detección del equipo (1.6 mg/Kg) (Cuadro 3)

Cuadro 3. Concentración mínima, máxima y promedio anual (Enero 2009 a Febrero 2010) (mg/kg Base Seca) de metales pesados en *Eugerrres plumieri* en la laguna de Tampamachoco

Metal	L.D mg/Kg	Músculo	Piel	Branquia	Hígado
		Min - Máx $\bar{X}$	Min - Máx $\bar{X}$	Min - Máx $\bar{X}$	Min-Máx $\bar{X}$
Pb	0.06	2.5 - 41.32 9.858 ±12.08	0.23 -35.28 14.32 ±10.41	0.2980 -16.45 10.54 ± 4.55	8.296 -65.395 26.3 ± 19.77
Cr	0.05	2.7 -3.1 2.91	0.125- 4.30 1.59 ±1.09	1.42 - 6.32 3.53 ±1.58	0.48- 2.75 1.56 ±0.99
Cd	0.009	2.35 2.35	0.15 - 20.25 6.65 ± 8.34	0.3279 -1.60 0.71± 1.58	0.048 - 26.66 3.18 ±7.18
Cu	0.025	1.12- 4.28 2.43 ±0.95	2.97 -19.45 5.61±4.12	4.55- 6.99 5.28 ±0.71	1.93 - 29.17 12.12 ±6.71
Ba	0.18	4.24- 54.03 28.67±15.87	3.38 - 67.84 33.44 ±20.31	13.54- 100.44 74.117 ±20.85	1.54-101.46 52.54 ±25.60
Hg	1.6	< L.D	< L.D	< L.D	< L.D

L.D.=Límite de detección; L.M.P.= Límite Máximo Permitido

LMP NOM 242-SSA-1-2009 (Pb = 0.5 mg/Kg, Cd = 0.5 mg/Kg, Hg = 1.0 mg/Kg)

LMP Oficina de Gobierno Central de Hong Kong (Nauen, 1983) (Pb=6.0 mg/Kg, Cr= 1.0 mg/Kg, Cd =2.0 mg/ Kg)

LMP FAO, 1983 ( Cu =32.5 mg/Kg)

LMP CECA, (SEDUE, 1989) (Ba = 0.5 mg/Kg)

LMP FDA (1978) (Ba = 1.0 mg/Kg)

IX.2.2.1 **Plomo.**

Las máximas concentraciones de Pb registradas fueron para el músculo 41.325 mg/kg, en piel 35.275 mg/Kg, en branquias 16.45 mg/Kg y en hígado 65.395 mg/Kg. Las concentraciones promedio anuales registradas para músculo (9.85 mg/Kg), piel (14.31 mg/Kg), branquias (10.54 mg/kg) e hígado (15.25 mg/Kg). Las mayores concentraciones se registraron de abril a agosto (Cuadro 3, Figuras14 y 15).

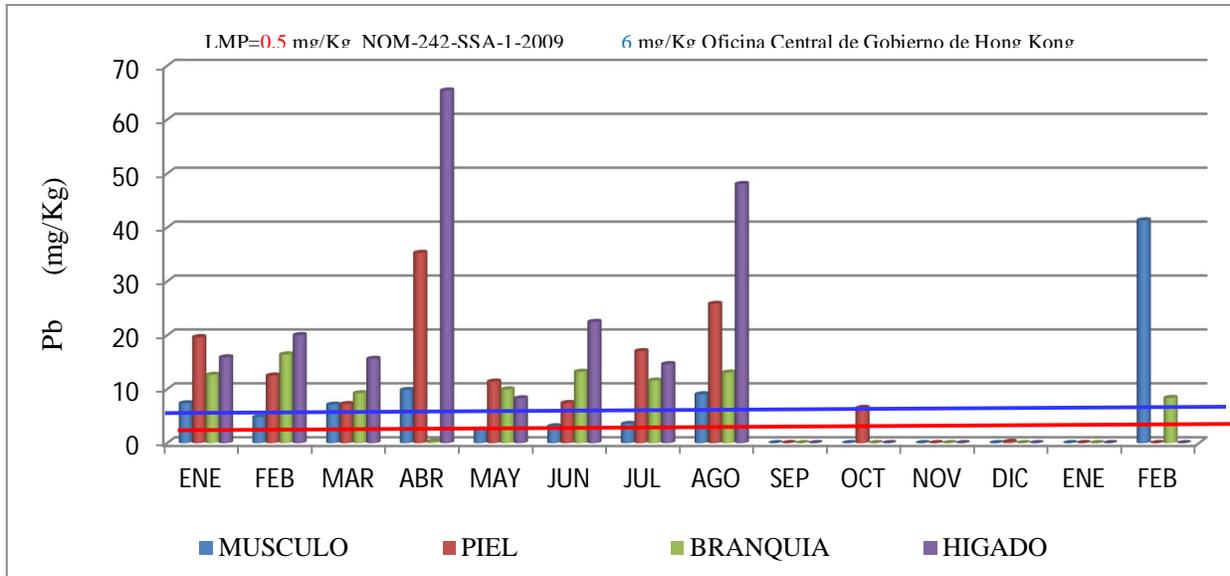


Figura 14. Concentración mensual (Enero 2009 -Febrero 2010) de Pb en tejidos y órganos de *E. plumieri* de la Laguna de Tampamachoco, Veracruz.

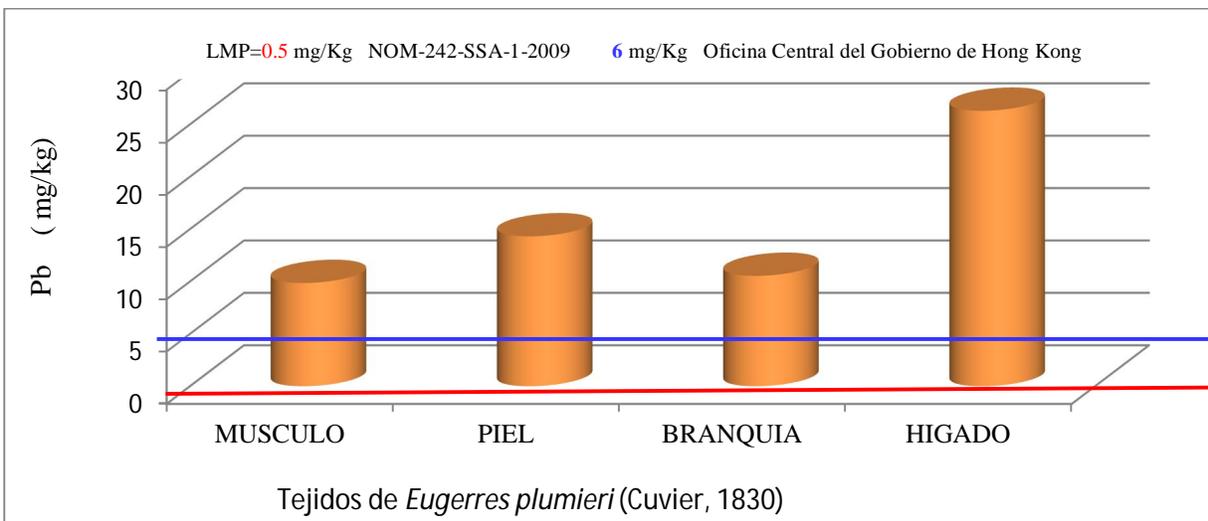


Figura 15. Concentración promedio anual (Enero 2009 -Febrero 2010) de Pb en tejidos y órganos de *E. plumieri* de la Laguna de Tampamachoco, Veracruz.

### IX.2.2.3 Cromo.

Las concentraciones máximas reportan valores en el músculo de 3.1 mg/Kg 2010, en piel 4.3 mg/kg, hígado 2.75 mg/Kg y branquias 6.32 mg/Kg en diciembre. Las concentraciones promedio anual en músculo son 2.91mg/Kg, en piel 1.59 mg/Kg, en branquias 3.53 mg/Kg e hígado 1.56 mg/Kg (Cuadro 3, Figuras16 y 17).

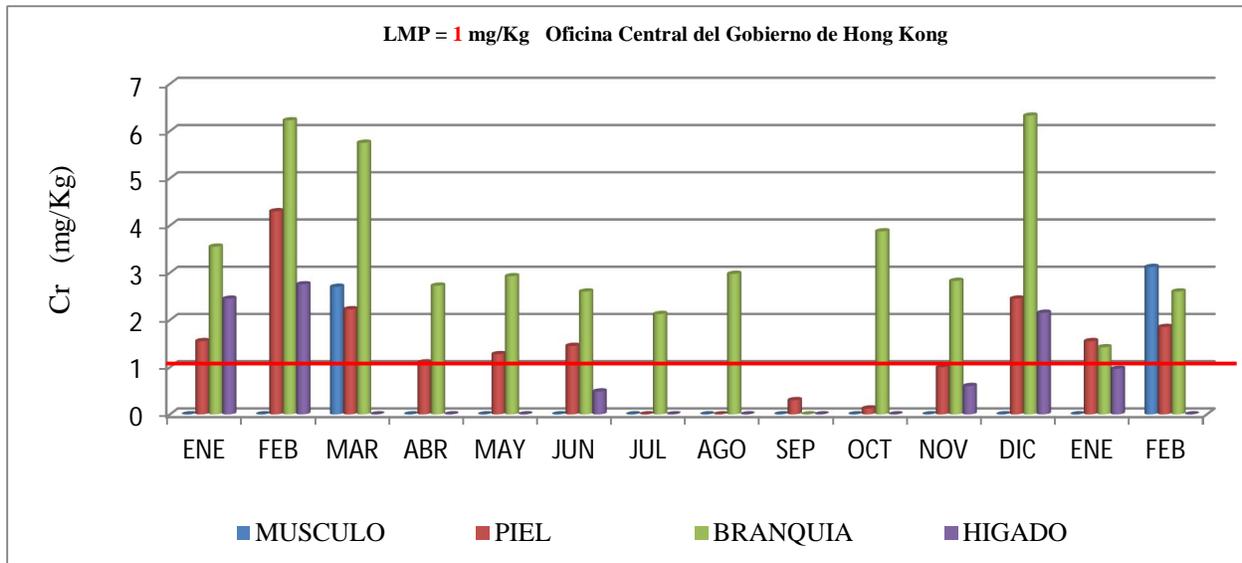


Figura 16. Concentración mensual (Enero 2009 - Febrero 2010) de Cr en tejidos y órganos de *E. plumieri* de la Laguna de Tampamachoco, Veracruz.

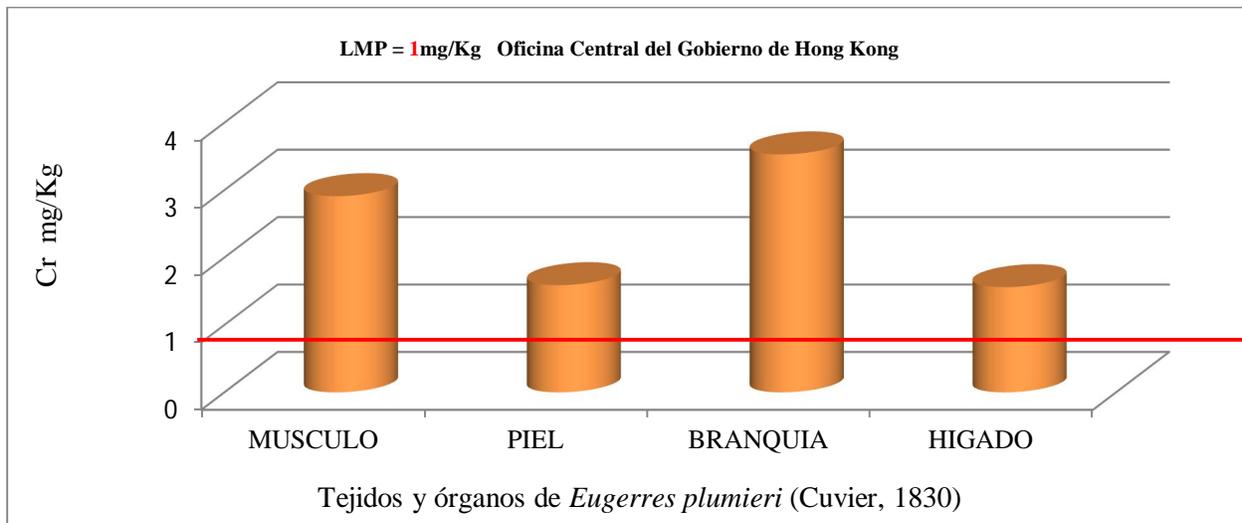


Figura 17. Concentración promedio anual (Enero 2009 - Febrero 2010) de Cr en tejidos y órganos de *E. plumieri* de la laguna de Tampamachoco, Veracruz.

### IX.2.2.3 Cadmio.

Las concentraciones máximas detectadas de Cd fueron en músculo 2.35 mg/Kg, en piel 20.25mg/Kg, branquias 1.60 mg/Kg e hígado 26.6 mg/Kg. Las concentraciones promedio anuales son en músculo 2.35 mg/Kg, en piel 6.65 mg/Kg, branquias 0.71 mg/Kg e hígado 3.18 mg/Kg (Cuadro 3, Figuras 18 y 19)

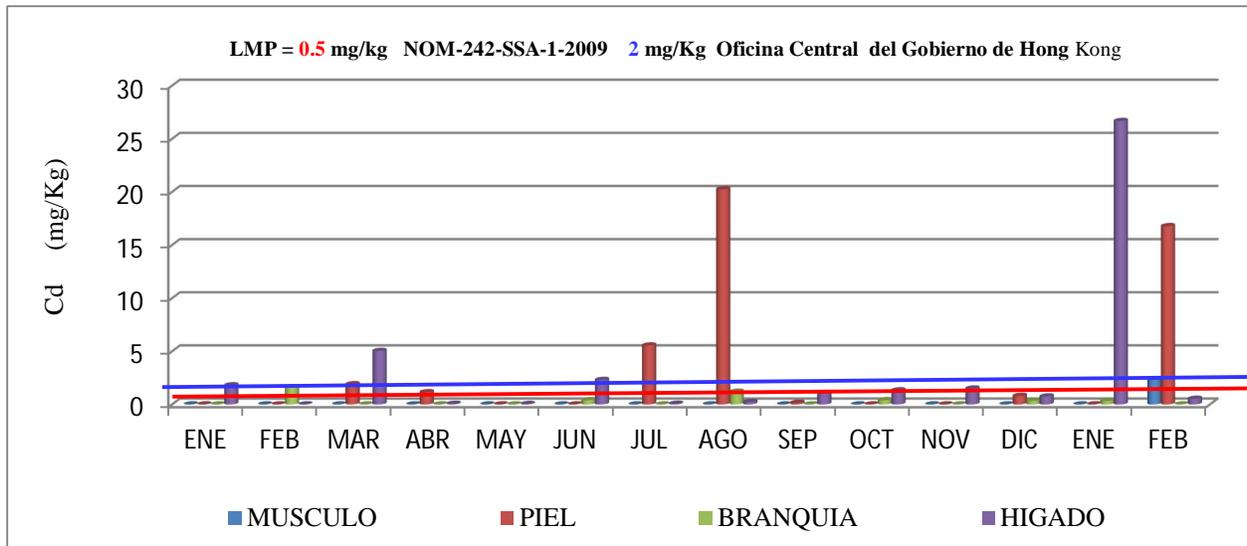


Figura 18. Concentración mensual (Enero 2009 - Febrero 2010) de Cd en tejidos y órganos de *E. plumieri* de la laguna de Tampamachoco, Veracruz.

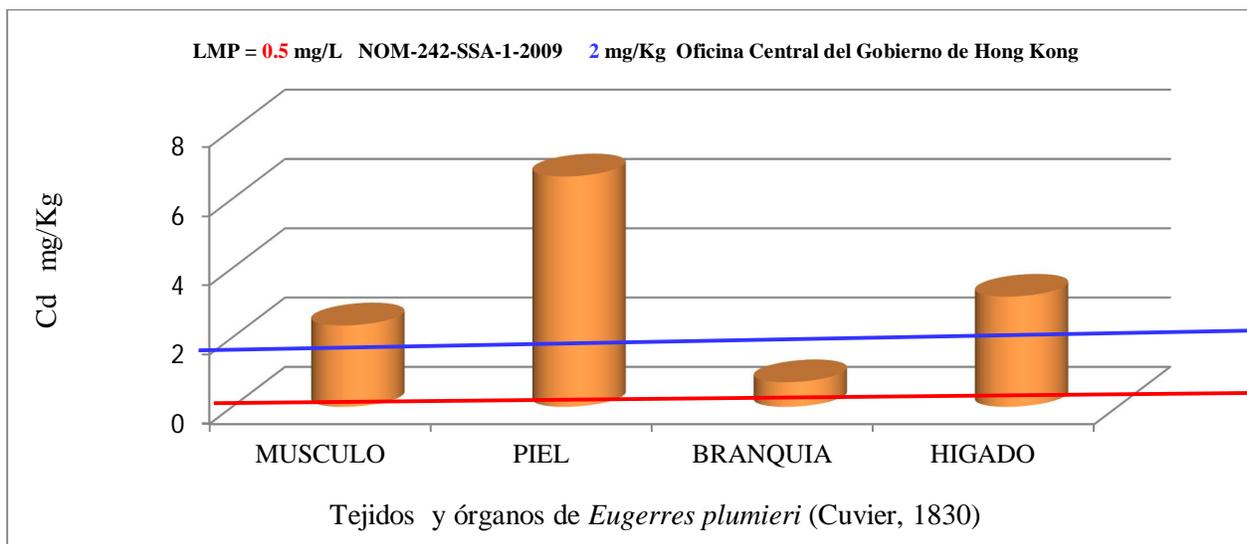


Figura 19. Concentración promedio anual (Enero 2009 - Febrero 2010) de Cd en tejidos y órganos de *E. plumieri* de la Laguna de Tampamachoco, Veracruz.

#### IX.2.2.4 Cobre.

Las concentraciones máximas de Cu reportadas para los tejidos analizados son 4.27 mg/kg en músculo, 19.45 mg/kg en piel, 6.99 mg/kg en branquias y 29.17 mg/kg en hígado. Las concentraciones promedio fueron de 2.43 mg/Kg en músculo, 5.61 mg/Kg en piel, 5.28 mg/Kg en branquias y 12.12 mg/Kg en hígado (Cuadro 3, Figuras 20 y 21).

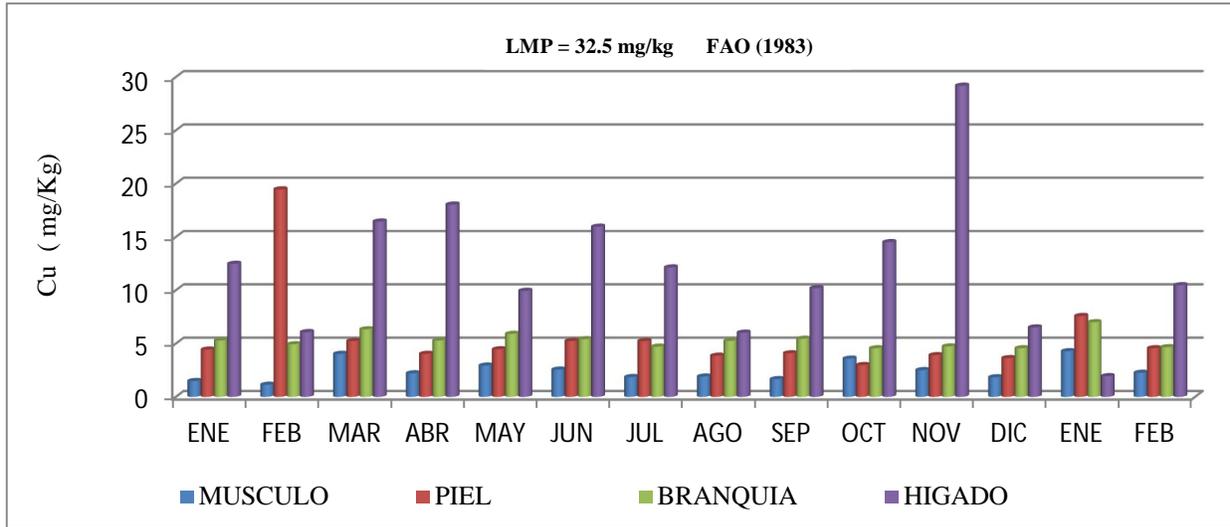


Figura 20. Concentración mensual (Enero 2009 - Febrero 2010) de Cu en tejidos y órganos de *E. plumieri* de la laguna de Tampamachoco, Veracruz.

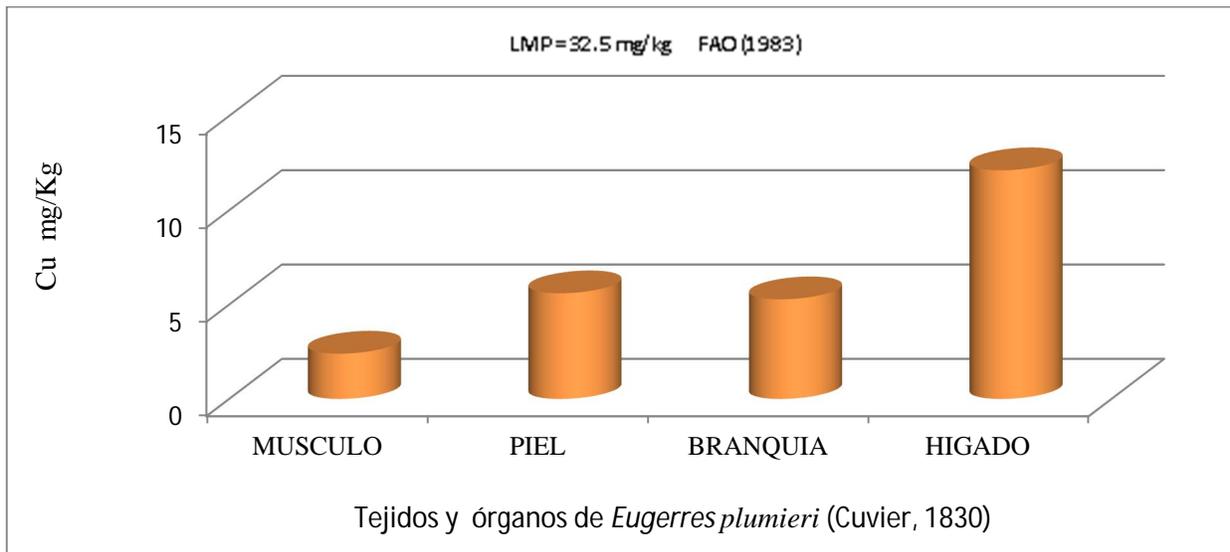


Figura 21. Concentración promedio anual (Enero 2009 - Febrero 2010) de Cu en tejidos y órganos de *E. plumieri* de la Laguna de Tampamachoco, Veracruz.

**IX.2.2.5 Bario.**

El bario se registró en concentraciones máximas en el músculo de 54.025 mg/Kg, en piel 67.84, mg/kg, en branquias 100.44 mg/kg y el hígado 101.467 mg/kg. Los promedios anuales fueron de 28.67 mg/Kg en músculo, piel 33.44 mg/Kg, branquias 74.11 mg/Kg, e hígado 52.55 mg/Kg (Cuadro 3, Figuras 22 y 23).

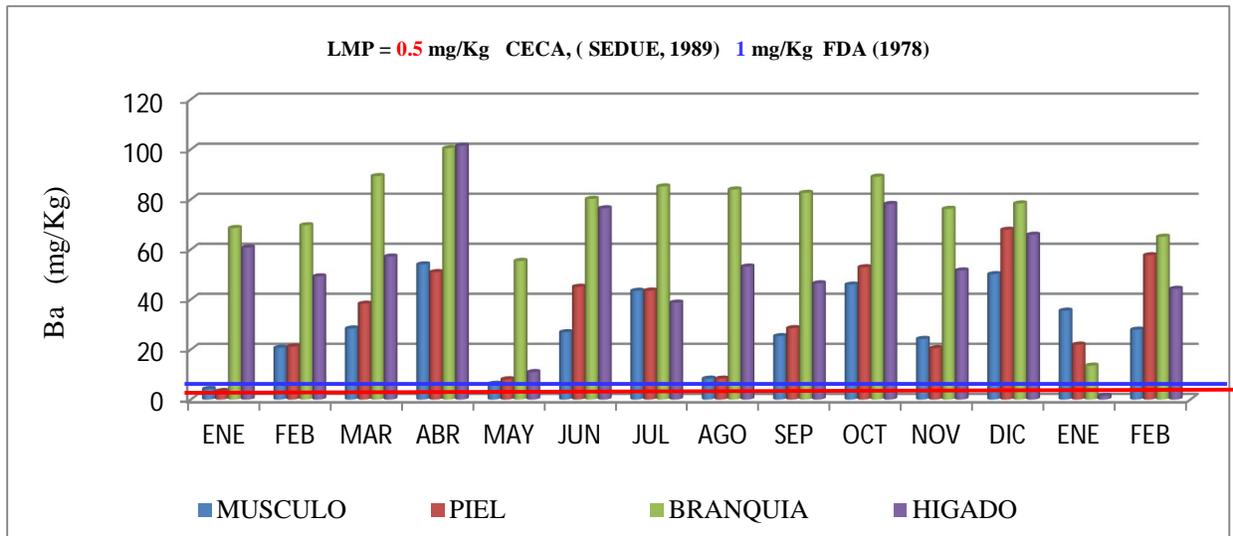


Figura 22. Concentración mensual (Enero 2009 - Febrero 2010) de Ba en tejidos y órganos de *E. plumieri* de la Laguna de Tampamachoco, Veracruz.

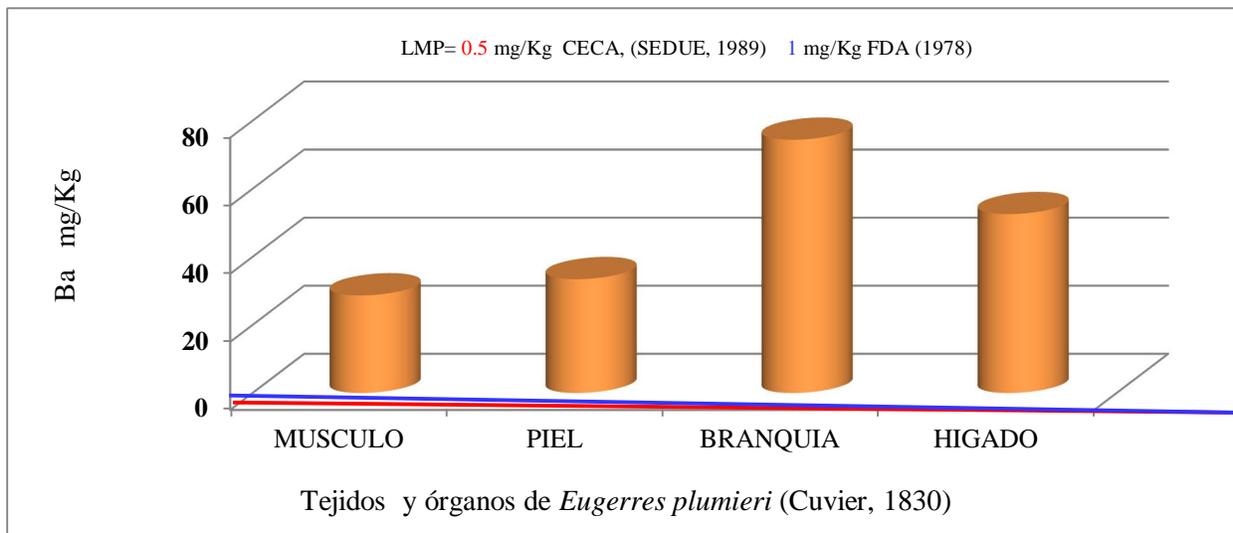


Figura 23. Concentración promedio anual (Enero 2009 - Febrero 2010) de Ba en tejidos y órganos de *E. plumieri* de la Laguna de Tampamachoco, Veracruz.

Los análisis de varianza realizados para comparar las concentraciones de metales pesados en cada uno de los tejidos, se encontró que para el Pb, Cd y Cr no hubo diferencias estadísticamente significativas con una  $p > 0.05$ , mientras que el Cu y el Ba si presentan diferencias estadísticamente significativas  $p < 0.05$ : Es importante señalar que en el hígado se registró la mayor concentración de Pb y Cu y la menor de Cr; en la branquia se registró la mayor concentración de Ba y Cr. La piel registró la mayor concentración de Cd En el músculo se registró la menor concentración de Pb, Cu y Ba.

La correlación de las concentraciones de metales en cada uno de los tejidos con respecto a las variables fisicoquímicas, nos indican que en el músculo la mayor correlación se presentó para el Pb, Cr y Cd con la temperatura ( $r^2 = 37.8$ ;  $r^2 = 52.11$  y  $r^2 = 52.8$ ) respectivamente. En la piel la mayor correlación se presentó entre el Pb y la salinidad ( $r^2 = 49.62$ ), seguida en menor grado por el porcentaje de oxígeno disuelto ( $r^2 = 36.01$  y en menor proporción el Cr con el oxígeno disuelto ( $r^2 = 31.88$ ). En la branquia se registró mayor correlación entre el Cr y la C.E. ( $r^2 = 95$ ). En el hígado la mayor correlación se presentó entre el Pb y la salinidad ( $r^2 = 43.7$ ).

### IX.2.3 Análisis de componentes principales

Se realizaron 2 análisis no paramétricos de componentes principales, con el propósito de evaluar cuales son las variables que explican el mayor porcentaje de la varianza acumulada en los dos primeros componentes.

El primer análisis corresponde a los tejidos y órganos de músculo, piel, branquias e hígado de *E. plumieri* durante 14 meses de colecta, considerando como variables (=caracteres) a los seis metales (Pb, Cr, Cd, Cu, Ba y Hg) y variables fisicoquímicas de temperatura, pH, oxígeno disuelto, porcentaje de saturación de oxígeno disuelto, salinidad, conductividad eléctrica, sólidos totales y transparencia.

El segundo análisis es de muestras de agua en cuatro sitios (La Mata, Isla Potreros, CFE y Pipiloya) durante 14 meses de colecta, considerando las mismas variables usadas en el análisis de tejidos.

Los análisis se realizaron con ayuda del programa NTSYS-pc Numerical Taxonomy and Multivariate Analysis System versión 2.02i, con los siguientes pasos:

1. Estandarización de la matriz básica de datos, por filas (caracteres) con la opción de sustracción por el método YBAR, en donde la medida de cada variable  $y$  es sustraída, mientras que en la opción de división el método fue de STD, en donde la diferencia es dividida por la desviación estándar.
2. Obtención de una matriz de correlación entre caracteres, a través de la opción SimInt, con el código para coeficiente CORR, que es la correlación del producto-momento.
3. Cálculo de eigenvectores y eigenvalores, mediante la opción Eigen. Se extrajeron los primeros tres ejes de la matriz de correlación y se realizó con el método SQRT (LAMBDA), donde la longitud es igual a la raíz cuadrada de un eigenvalor.
4. Proyección de los OTUs en el espacio delimitado por los factores o componentes. La proyección se realizó por columnas, con el método  $P = F^t O$ . Donde F es igual a la variable por K dimensiones de la matriz factor y O es la matriz de entrada que fue estandarizada con n variables y t objetos (por default, los objetos corresponden a las columnas, pero otra opción puede ser que las filas corresponde a los objetos).
5. Visualización de los resultados en un gráfico bidimensional por medio de la opción 2D Plot. El trazo se realizó por filas.

#### Argumentación de caracteres

Se realizaron dos matrices de datos básicas: La de tejidos está conformada por 56 columnas y por 38 filas, mientras que la matriz de agua está constituida por 56 columnas y 14 filas.

Cuadro 4. OTUS considerados en el análisis de metales pesados en tejidos y órganos de *E. plumieri*

A	Músculo	enero, 2009	AC	branquia	enero, 2009
B	Músculo	febrero, 2009	AD	Branquia	febrero, 2009
C	Músculo	marzo, 2009	AE	Branquia	marzo, 2009
D	Músculo	abril, 2009	AF	Branquia	abril, 2009
E	Músculo	mayo, 2009	AG	Branquia	mayo, 2009
F	Músculo	junio,2009	AH	Branquia	junio,2009
G	Músculo	julio, 2009	AI	Branquia	julio, 2009
A	Músculo	agosto, 2009	AJ	Branquia	agosto, 2009
I	Músculo	septiembre, 2009	AK	Branquia	septiembre, 2009
J	Músculo	octubre, 2009	AL	Branquia	octubre, 2009
K	Músculo	noviembre, 2009	AM	Branquia	noviembre, 2009
L	Músculo	diciembre, 2009	AN	Branquia	diciembre, 2009
M	Músculo	enero, 2010	AO	Branquia	enero, 2010
N	Músculo	febrero, 2010	AP	Branquia	febrero, 2010
O	Piel	enero, 2009	AQ	Hígado	enero, 2009
P	Piel	febrero, 2009	AR	Hígado	febrero, 2009
Q	Piel	marzo, 2009	AS	Hígado	marzo, 2009
R	Piel	abril, 2009	AT	Hígado	abril, 2009
S	Piel	mayo, 2009	AU	Hígado	mayo, 2009
T	Piel	junio,2009	AV	Hígado	junio,2009
U	Piel	julio, 2009	AW	Hígado	julio, 2009
V	Piel	agosto, 2009	AX	Hígado	agosto, 2009
W	Piel	septiembre, 2009	AY	Hígado	septiembre, 2009
X	Piel	octubre, 2009	AZ	Hígado	octubre, 2009
Y	Piel	noviembre, 2009	BA	Hígado	noviembre, 2009
Z	Piel	diciembre, 2009	BB	Hígado	diciembre, 2009
AA	Piel	enero, 2010	BC	Hígado	enero, 2010
AB	Piel	febrero, 2010	BD	Hígado	febrero, 2010

VARIABLES (=caracteres) considerados en el análisis de tejidos:

1. Concentración de Pb en los tejidos de músculo, piel branquia e hígado. Las concentraciones menores al límite de detección del equipo (0.06 mg/kg), se codificaron como cero.
2. Concentración de Cd en los tejidos de músculo, piel branquia e hígado. Las concentraciones menores al límite de detección del equipo (0.009mg/kg), se codificaron como cero.
3. Concentración de Cr en los tejidos de músculo, piel branquia e hígado. Las concentraciones menores al límite de detección del equipo (0.05 mg/kg), se codificaron como cero.
4. Concentración de Ba en los tejidos de músculo, piel branquia e hígado. Las concentraciones menores al límite de detección del equipo (0.18 mg/kg), se codificaron como cero.
5. Concentración de Cu en los tejidos de músculo, piel branquia e hígado. Las concentraciones menores al límite de detección del equipo (0.025 mg/kg), se codificaron como cero.
6. Concentración de Hg en los tejidos de músculo, piel branquia e hígado. Las concentraciones menores al límite de detección del equipo (1.6 mg/kg), se codificaron como cero.
7. Temperatura del sitio La Mata.
8. Temperatura del sitio Isla Potreros.
9. Temperatura del sitio CFE.
10. Temperatura del sitio Pipiloya.
11. pH del sitio La Mata.
12. pH del sitio Isla Potreros.
13. pH del sitio CFE.
14. pH del sitio Pipiloya.
15. Oxígeno disuelto del sitio La Mata.
16. Oxígeno disuelto del sitio Isla Potreros.
17. Oxígeno disuelto del sitio CFE.
18. Oxígeno disuelto del sitio Pipiloya.
19. Porcentaje de saturación de oxígeno del sitio La Mata.
20. Porcentaje de saturación de oxígeno del sitio Isla Potreros.
21. Porcentaje de saturación de oxígeno del sitio CFE.
22. Porcentaje de saturación de oxígeno del sitio Pipiloya.
23. Salinidad del sitio La Mata.
24. Salinidad del sitio Isla Potreros.
25. Salinidad del sitio CFE.
26. Salinidad del sitio Pipiloya.
27. Conductividad eléctrica del sitio La Mata.
28. Conductividad eléctrica del sitio Isla Potreros.
29. Conductividad eléctrica del sitio CFE.

30. Conductividad eléctrica del sitio Pipiloya.
31. Sólidos totales disueltos del sitio La Mata.
32. Sólidos totales disueltos del sitio Isla Potreros.
33. Sólidos totales disueltos del sitio CFE.
34. Sólidos totales disueltos del sitio Pipiloya.
35. Transparencia del sitio La Mata.
36. Transparencia del sitio Isla Potreros.
37. Transparencia del sitio CFE.
38. Transparencia del sitio Pipiloya.

Cuadro 5. OTUS considerados en el análisis de metales pesados en agua en la Laguna de Tampamachoco, Veracruz

A	La Mata	enero, 2009	AC	CFE	enero, 2009
B	La Mata	febrero, 2009	AD	CFE	febrero, 2009
C	La Mata	marzo, 2009	AE	CFE	marzo, 2009
D	La Mata	abril, 2009	AF	CFE	abril, 2009
E	La Mata	mayo, 2009	AG	CFE	mayo, 2009
F	La Mata	junio, 2009	AH	CFE	junio, 2009
G	La Mata	julio, 2009	AI	CFE	julio, 2009
A	La Mata	agosto, 2009	AJ	CFE	agosto, 2009
I	La Mata	septiembre, 2009	AK	CFE	septiembre, 2009
J	La Mata	octubre, 2009	AL	CFE	octubre, 2009
K	La Mata	noviembre, 2009	AM	CFE	noviembre, 2009
L	La Mata	diciembre, 2009	AN	CFE	diciembre, 2009
M	La Mata	enero, 2010	AO	CFE	enero, 2010
N	La Mata	febrero, 2010	AP	CFE	febrero, 2010
O	Isla Potreros	enero, 2009	AQ	Pipiloya	enero, 2009
P	Isla Potreros	febrero, 2009	AR	Pipiloya	febrero, 2009
Q	Isla Potreros	marzo, 2009	AS	Pipiloya	marzo, 2009
R	Isla Potreros	abril, 2009	AT	Pipiloya	abril, 2009
S	Isla Potreros	mayo, 2009	AU	Pipiloya	mayo, 2009
T	Isla Potreros	junio, 2009	AV	Pipiloya	junio, 2009
U	Isla Potreros	julio, 2009	AW	Pipiloya	julio, 2009
V	Isla Potreros	agosto, 2009	AX	Pipiloya	agosto, 2009
W	Isla Potreros	septiembre, 2009	AY	Pipiloya	septiembre, 2009
X	Isla Potreros	octubre, 2009	AZ	Pipiloya	octubre, 2009
Y	Isla Potreros	noviembre, 2009	BA	Pipiloya	noviembre, 2009
Z	Isla Potreros	diciembre, 2009	BB	Pipiloya	diciembre, 2009
AA	Isla Potreros	enero, 2010	BC	Pipiloya	enero, 2010
AB	Isla Potreros	febrero, 2010	BD	Pipiloya	febrero, 2010

VARIABLES (CARACTERES CONSIDERADOS EN EL ANÁLISIS DE AGUA:

1. Concentración de Pb en agua en los sitios de La Mata, Isla Potreros, CFE y Pipiloya. Las concentraciones menores al límite de detección del equipo (0.06 mg/L) se codificaron como cero.
2. Concentración de Cd en agua en los sitios de La Mata, Isla Potreros, CFE y Pipiloya. Las concentraciones menores al límite de detección del equipo (0.009 mg/L) se codificaron como cero.
3. Concentración de Cr en agua en los sitios de La Mata, Isla Potreros, CFE y Pipiloya. Las concentraciones menores al límite de detección del equipo (0.05 mg/L) se codificaron como cero.
4. Concentración de Ba en agua en los sitios de La Mata, Isla Potreros, CFE y Pipiloya. Las concentraciones menores al límite de detección del equipo (0.18 mg/L) se codificaron como cero.
5. Concentración de Cu en agua en los sitios de La Mata, Isla Potreros, CFE y Pipiloya. Las concentraciones menores al límite de detección del equipo (0.025 mg/L) se codificaron como cero.
6. Concentración de Hg en agua en los sitios de La Mata, Isla Potreros, CFE y Pipiloya. Las concentraciones menores al límite de detección del equipo (1.6 mg/L) se codificaron como cero.
7. Variación de temperatura en los sitios de La Mata, Isla Potreros, CFE y Pipiloya.
8. Variación de pH en los sitios de La Mata, Isla Potreros, CFE y Pipiloya.
9. Variación de oxígeno disuelto en los sitios de La Mata, Isla Potreros, CFE y Pipiloya.
10. Variación de porcentaje saturación de oxígeno en los sitios de La Mata, Isla Potreros, CFE y Pipiloya.
11. Variación de salinidad en los sitios de La Mata, Isla Potreros, CFE y Pipiloya.
12. Variación de conductividad eléctrica en los sitios de La Mata, Isla Potreros, CFE y Pipiloya.
13. Variación de sólidos totales disueltos en los sitios de La Mata, Isla Potreros, CFE y Pipiloya.
14. Variación de transparencia en los sitios de La Mata, Isla Potreros, CFE y Pipiloya.

Análisis de componentes principales para la base de datos de los tejidos de músculo, piel, branquia e hígado 14 meses de muestreo y 38 variables

El análisis de componentes principales (CP) aplicado a la base de datos explicó el 67.27 % de la variación acumulada en los tres primeros componentes; el CP1 explicó el 38.15%, el CP2 el 16.45% y el CP3 el 12.66% respectivamente (Cuadro 6).

Cuadro 6. Eigenvalores y proporción de la varianza acumulada en los tres primeros componentes principales en tejido

	PC 1	PC 2	PC 3
Eigenvalores	14.11	6.08	4.68
Porcentaje	38.15	16.45	12.66
Acumulado	38.15	54.61	67.27

Cuando se observa la posición de los OTUS (= tejidos en los 14 meses de muestreo) en el espacio, la combinación de los componentes uno y dos separa a las muestras en tres grupos: la primera agrupación corresponde a las muestras (W, Y, X, AK, AL, AZ) ubicadas en el extremo izquierdo inferior del gráfico. La segunda agrupación está conformada por (B, D, J, K, M, N, Q, R, AA, AB, AD, AE, AF, AN, AO, AR, AS, AT, BA, BB, BC, AQ, AP) localizadas en el extremo derecho inferior. La tercera agrupación está constituida por (E, H, I, P, S, U, V, AG, AH, AJ, AV, AX, AW) ubicadas en el cuadrante superior derecho. Así mismo, el análisis excluye al punto AY (Figura 24).



El primer componente está representado por la correlación que mantienen las variables 23 (Salinidad del sitio La Mata), 24 (Salinidad del sitio Isla Potreros), 27 (Conductividad eléctrica del sitio La Mata), 31 (Sólidos totales disueltos del sitio La Mata) y 32 (Sólidos totales disueltos del sitio Isla Potreros). El componente dos está determinado por los variables 9 (Temperatura del sitio CFE), 13 (pH del sitio CFE), 14 (pH del sitio Pipiloya), 15 (Oxígeno disuelto del sitio La Mata), 16 (Oxígeno disuelto del sitio Isla Potreros). El componente tres está determinado por los variables 6 (Hg), 7 (Temperatura del sitio La Mata), 8 (Temperatura del sitio Isla Potreros), 9 (Temperatura del sitio CFE) y el 37 (Transparencia en el sitio (CFE) Cuadro 7.

Cuadro 7. Coeficiente de cada variable en los primeros tres componentes principales de la matriz básica de datos de tejidos con 56 OTUS y 37 variables

Variable	CP 1	CP 2	CP 3	Variable	CP 1	CP 2	CP 3
1	0.4177	0.1444	0.1127	20	0.4581	-0.4595	0.598
2	-0.0059	0.0203	-0.3628	21	0.8056	-0.2747	0.0295
3	0.0988	-0.2665	-0.02918	22	0.911	0.205	-0.0374
4	-0.0616	0.0487	0.1958	23	0.9607	0.1219	-0.1056
5	0.0672	-0.0392	0.166	24	0.9417	0.1999	-0.1267
6	0.0626	0.6191	0.7256	25	0.9334	0.2549	-0.1151
7	-0.0403	0.6395	0.7308	26	0.9198	0.2082	-0.0507
8	-0.0071	0.7179	0.659	27	0.9602	0.1293	-0.1132
9	0.0141	0.7255	0.6107	28	0.9283	0.1647	-0.2431
10	0.3226	-0.0462	0.1741	29	0.9236	0.2063	-0.2359
11	0.1604	-0.1725	0.4598	30	0.9168	0.2103	-0.0325
12	0.3407	-0.2763	0.2986	31	0.956	0.0668	-0.025
13	0.6378	0.0885	0.0623	32	0.9411	0.1301	-0.0424
14	0.3282	-0.8876	0.2269	33	0.9278	0.0178	-0.0264
15	0.2170	-0.8538	0.3780	34	0.2893	0.4152	-0.5368
16	0.2389	-0.8077	0.3695	35	0.1887	0.1475	-0.4752
17	0.6265	-0.4475	-0.0874	36	-0.5539	-0.2331	-0.1996
18	0.6462	-0.5526	0.4271	37	0.2169	-0.3719	-0.6307
19	0.6462	-0.5526	0.4271				

Los tejidos piel, branquias e hígado en los meses de septiembre, octubre y noviembre en el análisis de componentes principales se comportaron diferente del resto de las muestras. Periodo que corresponde a la temporada de lluvias en la Laguna de Tampamachoco, determinado por los parámetros físicos de salinidad, conductividad y pH los cuales a su vez establecieron el comportamiento de los metales en este estudio.

Análisis de componentes principales para la base de datos de agua en los cuatro sitios de colecta para 14 meses de muestreo, con 14 variables

El análisis de componentes principales aplicado a la base de datos explicó el 62.02 % de la variación acumulada en los tres primeros componentes; el CP1 explicó el 31.51%, el CP2 el 17.73% y el CP3 el 12.77% respectivamente (Cuadro 8).

Cuadro 8. Eigenvalores y proporción de la varianza acumulada en los tres primeros componentes principales en agua

	PC 1	PC 2	PC 3
Eigenvalores	3.46	1.95	1.40
Porcentaje	31.51	17.73	12.77
Acumulado	31.51	49.25	62.02

Cuando se observa la posición de los OTUS (= agua en los 14 meses de muestreo) en el espacio, la combinación de los componentes uno y dos separa a las muestras en tres grupos: la primera agrupación corresponde a las muestras (I, J, K, W, X, AK, AL, AY, AZ, ubicadas en el extremo izquierdo inferior del gráfico. La segunda agrupación está conformada por (A, B, C, D, L, M, N, O, P, Q, R, Y, Z, AA, AB, AC, AD, AE, AF, AG, AM, AO, AP, AQ, AR, AS, AT, BD, BC) localizadas en el extremo derecho inferior. La tercera agrupación está constituida por (E, F, G, H, S, T, U, V, AH, AI, AJ, AN, AU, AV, AW, AX, BA, BB, ubicadas en el cuadrante superior derecho (Cuadro 7).

El primer componente está representado por la correlación que mantienen las variables 6 (Hg), 7 (Temperatura), 8 (pH), 9 (Oxígeno disuelto) y 10 (Porcentaje de saturación de oxígeno disuelto). El componente dos está determinado por los variables 1 (Pb), 2 (Cd), 4 (Ba), 6 (Hg) y 7 (Temperatura). El componente tres está determinado por los variables 1(Pb), 2 (Cd), 4(Ba), 5(Cu) y 11 (Salinidad) (Cuadro 9).

Cuadro 9. Coeficiente de cada variable en los primeros tres componentes principales de la matriz básica de datos de agua con 56 OTUS y 11 variables

	CP 1	CP 2	CP 3
1	0.1841	0.4227	0.1453
2	-0.0768	0.4296	0.3957
3	0.0611	-0.0143	0.1003
4	0.0079	0.4137	-0.7090
5	0.4243	-0.198	-0.2370
6	0.4522	-0.8435	0.1249
7	0.6964	-0.614	-0.0627
8	0.9159	0.3425	0.0126
9	0.9310	0.2644	0.0546
10	0.9184	0.3042	-0.0302
11	0.0706	0.0925	0.7966

Las localidades de la Mata, Isla Potreros y CFE en los meses de septiembre, octubre y noviembre en el análisis de componentes principales se comportaron diferente del resto de las muestras. Periodo que corresponde a la temporada de lluvias en la laguna de Tampamachoco, determinado por los parámetros físicos de la salinidad, conductividad y pH los cuales a su vez determinaron el comportamiento de los metales en este estudio.

Este mismo análisis, determinó que la localidad de Pipiloya en el mes de septiembre, se comportó diferente del resto de las localidades, por el pH registrado, quedando aislado en el cuadrante superior izquierdo de la (Figura 25).

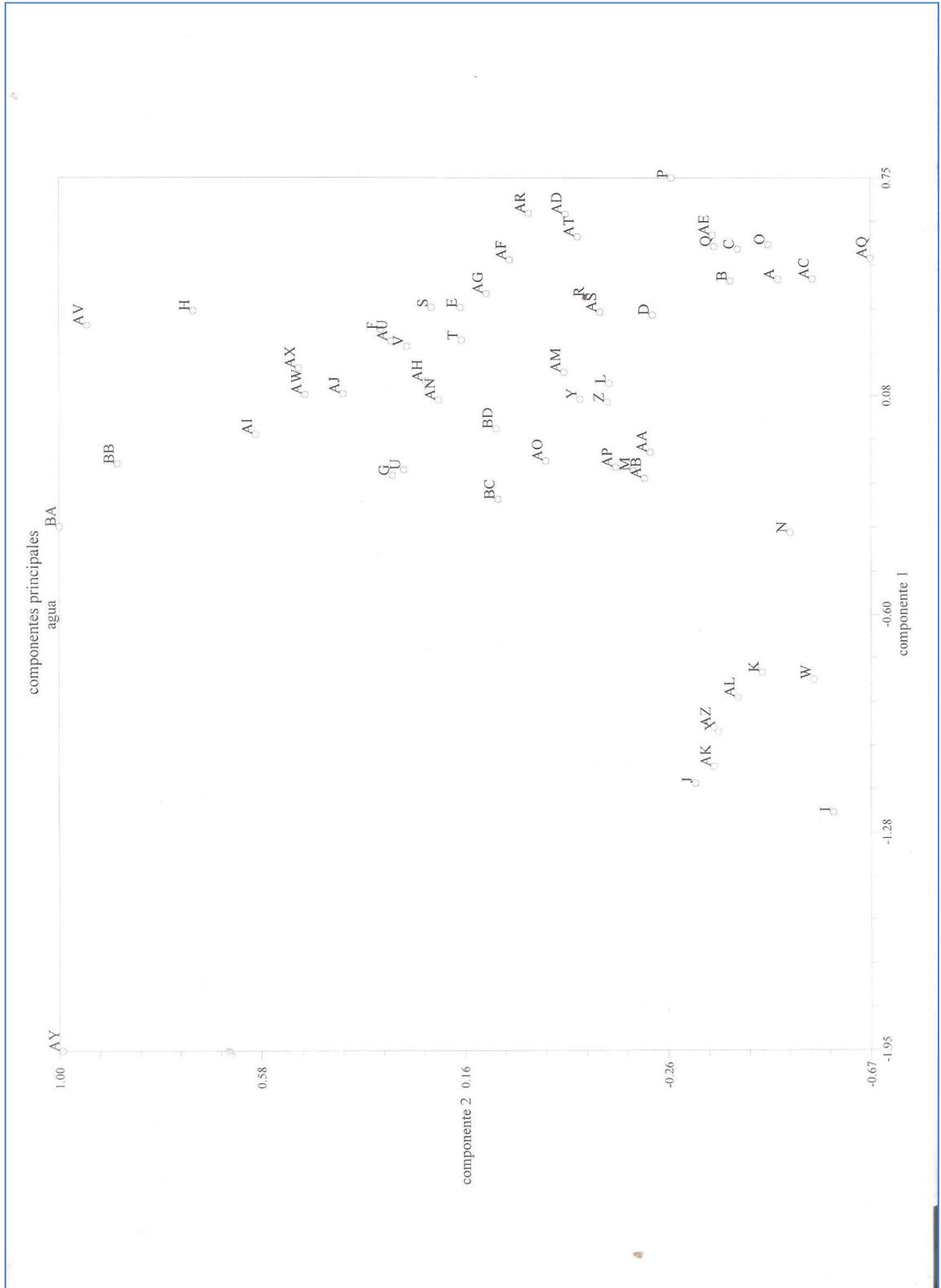


Figura 25. Combinación de Componentes Principales en agua

## X. DISCUSIÓN

El comportamiento de las variables fisicoquímicas de La Laguna de Tampamachoco durante el periodo de muestreo fue estacional. Las temperaturas máximas se registraron en primavera-verano y las mínimas en invierno, coincidiendo con Ocaña y Sánchez (2003) que mencionan que la temperatura superficial de esta laguna, varió entre 20 y 24°C en otoño 1987-invierno 1988 y de 27 a 34°C en primavera-verano 1988. Las fluctuaciones moderadas de la temperatura en los ecosistemas tropicales, propician un entorno favorable para la reproducción de una gran variedad de organismos. La variación de la temperatura puede tener un impacto ecológico significativo, ya que es un factor abiótico que regula procesos vitales para los organismos vivos

Con respecto al pH, se registraron condiciones de ligeramente ácidas a ligeramente básicas de 6.3 a 8.1, los valores más bajos se presentaron en otoño al igual que la salinidad, relacionados con la entrada de agua dulce. Los mayores valores se registraron en invierno. Estos valores están por debajo de los valores promedio reportados por Contreras y Warner (2004) de 8.0; 8.1 y 8.2 para los periodos 79-80; 90-91 y 94-95 respectivamente para esta laguna.

Las bajas concentraciones de oxígeno disuelto estuvieron asociadas a temperaturas altas (verano) y las concentraciones altas con bajas temperaturas (invierno). De acuerdo a los valores establecidos en los CECA (SEDUE, 1989), la concentración de oxígeno disuelto en el agua para uso de protección para la vida acuática debe tener un mínimo de 5 mg/L, los resultados de este estudio obtenidos cumplen con estos criterios. Kennish (1986) sugirió que cuando la materia orgánica se incrementa, los microorganismos lo descomponen, removiendo el oxígeno de la columna de agua. Los resultados son similares a los resultados reportados por Contreras y Gutiérrez (1990) en otros sistemas de agua en el estado de Veracruz.

Las altas salinidades de este estudio están asociadas con altas temperaturas, posiblemente se debe a los procesos de evaporación y precipitación. Durante la época de secas, hay menor aporte fluvial y una marcada influencia marina alcanzando valores promedio más altos.

Las variables físico-químicas que tuvieron más relación con la presencia de metales pesados en el agua y tejidos de *E. plumieri*, son la temperatura, pH, salinidad y oxígeno disuelto. Las temperaturas altas en el medio acuático influyen en las concentraciones de oxígeno disuelto, incrementando la ventilación de las branquias, hecho que probablemente aumente la exposición de los peces a los metales pesados en ambientes contaminados (Espina y Vanegas, 2005). Los pH ácidos aumentan la acumulación y disponibilidad de los metales, ya que tienden a estar disponibles a pH ácido, por otra parte, la potencia de un contaminante es inversamente relacionado con la salinidad. La salinidad modifica la captación de los metales pesados, bajas salinidades, incrementan su biodisponibilidad y la incorporación debido a los cambios en la especiación química del metal, por los efectos del metal en los mecanismos de regulación iónica y osmótica en el organismo al bajar la salinidad (Rainbow, *et al.*, 1993)

En el agua de la laguna no se detectó la presencia de Pb y Cd, y el Hg se registró por debajo del límite de detección del equipo (1.6 mg/L), esto debido posiblemente a que la presencia de metales pesados es menor en el agua que en los sedimentos y los organismos, influido en gran medida por el intercambio de agua por las mareas y aportes fluviales. Por lo tanto, se difiere con la concentración de 0.046 mg/L de Pb y 0.001 mg/L de Cd reportados por Rosas *et al.* (1983).

El Cr registrado en este trabajo fluctuó entre 0.0306 a 0.2055 mg/L. Los valores de La Mata, Isla Potreros y CFE superaron el límite máximo permitido en aguas costeras que es de 50.0 µg/L (0.05 mg/L) establecido por (SEDUE 1990) y los CECA (SEDUE, 1989) y están por debajo de 0.5 mg/L de la NOM-001-SEMARNAT-1996. De septiembre a febrero 2010, no se detectó. Los valores encontrados difiere con los 0.001 mg/L para esta laguna reportado por Rosas *et al.*, (1983), esta diferencia puede deberse a que ha pasado muchos años en que se realizó el estudio.

El Cu en el agua registrado fluctuó de 0.025 y 0.4672 mg/L. Los valores están por debajo de los 5 mg/L permitidos por la Norma Ecológica Mexicana para Aguas Costeras NOM-001-ECOL-1996 y 4 mg/L de la NOM-001-SEMARNAT-1996. Están por arriba de los 0.003 mg/L recomendado por los CECA (SEDUE, 1989) para la protección de la vida acuática con excepción de

Pipiloya. Aunque no se tienen registros por otros autores para esta laguna, ésta es una concentración baja comparado con lo reportado por Vázquez *et al.* (1995) quienes reportaron en la laguna de Mandinga concentraciones de  $4.01 \mu\text{g/g}^{-1}$  de Cu en agua. Esto quiere decir que la Laguna de Tampamachoco tiene niveles muy bajos de contaminación de Cu en comparación con otras lagunas costeras de la República Mexicana.

La concentración de bario en agua está por debajo de LMP recomendado por los CECA (SEDUE, 1989) que es de 0.5 mg/L. Aunque no se tienen registros previos del Ba para esta Laguna, los valores de 0.198 a 0.21 mg/L, no coinciden con los 767 mg/L reportados Rosales *et al.* (1994) en la Sonda de Campeche.

En los tejidos de *E. plumieri* se detectaron Pb, Cr, Cd, Ba y Cu, con excepción del Cu, todos rebasan los LMP establecidos por la normatividad.

En relación a la presencia de plomo en tejidos de *E. plumieri*, las concentraciones promedios encontradas en la laguna están por arriba del límite máximo permisible establecido en la NOM 242-SSA-1-2009 que es de 0.5 mg/Kg. En músculo fue de 9.85 mg/kg, en piel 14.31 mg/Kg, en branquias 10.54 mg/Kg y en hígado 26.3 mg/Kg, difieren con lo reportado por Villanueva y Botello (2005) para *E. plumieri* en Costa de la Laguna Bat. No. 3 El Yucateco, Tabasco  $0.37 \mu\text{g g}^{-1}$ , en la Bat. No. 4,  $4.82 \mu\text{g g}^{-1}$ , en la entrada río Chicozapote  $2.7 \mu\text{g g}^{-1}$ . Vázquez *et al.* (2001) realizaron estudios de metales en peces y camarones de la zona de Campeche, reportando valores de Pb de 0.15- 8.5 mg/kg, valores parecidos a lo reportado en músculo y branquias de *E. plumieri*.

Sin embargo, estos datos si concuerdan con Pérez-Zapata *et al.* (1984) quienes analizaron dos especies de peces *Centropomus undecimalis* y *E. plumieri*, reportando que los valores más altos de Pb para estos organismos fueron cráneo y riñón con  $50.00 \mu\text{g/g}^{-1}$  respectivamente. Por su parte, Botello (1996) en un estudio en la laguna El Yucateco, Tabasco de metales en distintas especies de peces reportó que las concentraciones de Pb para *Cichlasoma friedrichthali* fueron las más altas reportadas para peces registrando  $15.68 \mu\text{g g}^{-1}$ , así como para cuatro especies más,

estando por arriba del LMP ( $2.50 \mu\text{g g}^{-1}$ ) para consumo de alimentos acuáticos (Nauen, 1983). Estos valores coinciden en piel y branquias de *E. plumieri*.

Debido a que no existe en México ni en Estados Unidos de América una legislación para los límites máximos permisibles del consumo de Cr, y con el objeto de establecer un límite de referencia para comparar las concentraciones, se consideró el valor de la Oficina Central del Gobierno Central de Hong Kong que es de  $1.0 \mu\text{g/g}$  ( $1 \text{ mg/Kg}$ ) (Nauen, 1983). Con base en este valor, los niveles de Cr en la Laguna de Tampamachoco se encuentran por encima de este límite permisible.

En relación al Cr en los tejidos de *E. plumieri*, Villanueva y Botello (2005) reportaron para esta especie en Costa de la Laguna Bat. No.3 El Yucateco, Tabasco  $< 0.05 \mu\text{g g}^{-1}$ , en la Bat No 4,  $0.07 \mu\text{g g}^{-1}$  y en la entrada río Chicozapote  $< 0.05 \mu\text{g g}^{-1}$  de Cr y Vázquez *et al.* (2001) realizaron estudios de metales en peces y camarones de la zona de Campeche, reportando valores de Cr de 1.3 - 9.8 mg/kg, coincidiendo con los valores reportados este estudio.

Vázquez *et al.* (2001) realizaron estudios de metales en peces y camarones de Campeche, reportando valores de Cu de 1.3 a 10.5 mg/kg y Villanueva *et al.* 1988 quienes reportaron para este organismo del Arroyo Teapa del Río Coatzacoalcos, Veracruz 5 mg/Kg, coinciden con los valores reportados es este estudio. El Cu es un elemento esencial en los humanos, ya que contribuye a la formación de glóbulos rojos y al mantenimiento de los vasos sanguíneos, nervios, sistema inmunitario. La deficiencia de Cu se asocia con la reducción en la formación de hemoglobina. Así mismo, estos autores reportaron concentraciones de Ba entre 9.3 a 55.7, mg/kg, estos valores están por arriba de los reportados de *E. plumieri* en este estudio. Existen estudios en el río Coatzacoalcos para ejemplares de peces de la especie *Bardiella ronchus* con un valor excepcionalmente alto de  $8.11 \mu\text{g/g}$ . Esto puede estar relacionado con los hábitos de alimentación y comportamiento de las especies, ya que al ser detritívoros, con un tipo de vida bentónico y sésil, permite que la ingestión y la bioacumulación del metal en sus tejidos sea mayor (Báez *et al.*, 1976).

El Hg no fue detectado en los tejidos de *Eugerres plumieri* analizados en la Laguna de Tampamachoco de acuerdo al límite de detección del equipo que es de 1.6 mg/Kg, sin embargo Villanueva y Botello (1992), en estudios realizados en agua, sedimento y organismos (*Crassostrea virginica*) en zonas costeras del golfo de México de 1972 a 1992, reportaron que el mayor impacto por Hg en el estado de Veracruz se presentó en la laguna de Pueblo Viejo y el río Coatzacoalcos.

De acuerdo a los análisis de varianza para comparar las concentraciones de metales en agua, no hubo diferencias significativas entre los cuatro sitios muestreados, en Pipiloya se registró las mayores concentraciones de Cr y Ba, mientras que en CFE fue Cu. En los tejidos, el Cd, Pb y Cr no presentaron diferencias significativas, mientras que el Cu y Ba si, indicando que es el músculo es el tejido que presenta la menor concentración de Pb, Cu, y Ba. En el hígado se registró la mayor concentración de Pb, Cu, mientras que la branquia se registró la mayor concentración de Cr y Ba y para la piel el Cd.

Simultáneamente a este trabajo, se analizó la presencia de metales pesados en sedimentos y tejidos de *Mugil curema* de la misma laguna, encontrando que en el agua se detectó la presencia de Cr, Cu, y Ba, donde solo el Cr rebasó el LMP de los CECA (SEDUE, 1989) y en sedimentos se detectaron Pb, Cr, Cu y Ba, rebasando los LMP por las normas mexicanas, y el Hg en sedimentos rebasó el límite de detección del espectrofotómetro de absorción atómica

En relación a los tejidos, en *E. plumieri* se detectaron Pb, Cr, Cd, Ba y Cu, mientras que en *Mugil curema*, se detectaron Pb, Cr, Ba y Cu, éste último no rebasó los LMP establecidos por las normas mexicanas e internacionales en ambos casos, y el Hg rebasó el límite de detección del equipo de absorción atómica.

## I. CONCLUSIONES

La Laguna de Tampamachoco tiene un comportamiento fisicoquímico estacional, en las estaciones de primavera-verano se registraron los mayores valores de temperatura, salinidad, conductividad eléctrica y los menores valores oxígeno disuelto y saturación de oxígeno, en invierno se registraron los mayores valores de pH, oxígeno disuelto, saturación de oxígeno, sólidos totales disueltos y transparencia y los menores valores de temperatura, en otoño los menores valores de pH, salinidad y sólidos totales disueltos. Especialmente tuvo un comportamiento homogéneo, las diferencias registradas se dieron entre los sitios 1 y 4. En el sitio 1 La Mata ubicada en el estero del río Tuxpan, se registraron los mayores valores de pH, oxígeno disuelto y transparencia y los menores valores de salinidad, conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos. En el sitio 4 Pipiloya, ubicado al norte de la laguna, se registraron los mayores valores de temperatura, salinidad y sólidos totales disueltos y los menores valores de pH, oxígeno disuelto, saturación de oxígeno y transparencia.

Los cambios de salinidad se ven influidos en gran medida por la entrada de agua marina y dulce, sobre todo ésta última en época de lluvias, disminuyendo considerablemente la salinidad y que es posible se deba a la evaporación (16%) y precipitación (63%) (De la Lanza-Espino, 1998). En base a los resultados registrados de salinidad, la laguna se considera del tipo estuarina, cuyo rango de salinidad es de 10 a 30 ups. Los valores de oxígeno disuelto y porcentaje de saturación de oxígeno se encuentran dentro del intervalo para la sobrevivencia de las especies que habitan la laguna, no hay evidencias de hipoxia. El pH se mantiene dentro de los parámetros normales para un agua salobre, se ubica en un rango de ligeramente ácido (6.3) a ligeramente básico (8.1), el cual favorece la precipitación de los metales pesados influyendo en la baja toxicidad de los mismos. La laguna no muestra diferencia significativa en sus características físico-químicas, los valores máximos y mínimos son consecuencia de los aportes de agua del río, Tuxpan, del agua marina y de los cambios estacionales, dado que en la región predominan épocas climáticas bien definidas, secas, lluvias y nortes.

En base a los resultados del análisis por componentes principales, las variables fisicoquímicas que influyeron en el comportamiento de los metales en el agua fueron la temperatura, pH y oxígeno disuelto y en los tejidos fueron la salinidad, conductividad eléctrica y pH. Tanto en el agua como en los tejidos, las muestras analizadas se comportaron diferente de septiembre a noviembre de 2009, periodo que corresponde a la temporada de lluvias en la Laguna de Tampamachoco.

En el agua de la laguna de Tampamachoco, se detectó la presencia de los metales pesados Cr, Cu y Ba, mientras que el Pb y Cd no se detectaron y el Hg se registró por debajo del límite de detección del equipo (1.6 mg/L), probablemente se deba a que la presencia de metales en agua es menor que en sedimentos y organismos debido al recambio del agua por las mareas y el río. Los sistemas costeros presentan procesos de autodepuración o lavado durante la época de lluvias, como se pudo observar en los meses de septiembre a diciembre, no se registró la presencia de metales

El Cr registrado en la Mata, Isla Potreros y CFE superaron el LMP de 0.05 mg/L establecido por los SEDUE, (1990) y 0.003 mg/L recomendado por los CECA (SEDUE, 1989), el Ba estuvo por abajo del LMP establecido por los CECA (SEDUE, 1989) 0.5 mg/L para la protección de la vida acuática, el Cu registró concentraciones que rebasan los recomendados para la protección de la vida acuática por los CECA (SEDUE, 1999), de 0.003 mg/L y por debajo de los 5 mg/L contemplados en la NOM-001-ECOL- 1996.

En los todos los tejidos y órganos analizados de *E. plumieri* se detectaron los metales pesados Pb, Cr, Cd, Cu y Ba, el Hg se registró por abajo del límite de detección (1.6 mg/Kg). La presencia de estos metales pesados en los tejidos, puede ser consecuencia de que en las zonas costeras los organismos con hábitos bentónicos son los más afectados debido a su interacción directa con los sedimentos. Los resultados obtenidos reflejan quizás dos posibles procesos que contribuyen a la forma como es asimilado el metal por las especies, primero, el tipo de alimentación y segundo, una progresiva bioacumulación, ya sea a partir de la absorción del metal desde el agua, o desde el sedimento, éste último pudiera ser más factible. Los hábitos ecológicos de las diferentes especies afectan en gran forma la captación del metal por el pez.

El Pb y Cd registraron valores que superan los 0.5 mg/ Kg establecido en la NOM -242-SSA1-2009. Productos y servicios. Productos de la pesca, frescos refrigerados, congelados y procesados. La presencia de Pb en los tejidos fue en hígado > piel > branquia > músculo y para el Cd fue en piel > músculo > hígado > branquias. Los efectos crónicos y agudos del Pb incluyen efectos histopatológicos, deformidades, neurotoxicidad, anemia hemolítica e inhibición en la síntesis de hemoglobina, estos efectos ocurren en peces, aun en concentraciones tan bajas del elemento en el agua como de 8 µg/L (Wright 2002, Páez-Osuna, 2005), mientras que el Cd es un xenobiótico importante en los ecosistemas acuáticos, no nutriente para la biota (Kochhann *et al.*, 2009), se acumula principalmente en el hígado y el riñón de los organismos, con efectos adversos en el crecimiento, la reproducción y el sistema respiratorio.

El Cr superó el límite máximo permitido de 1 mg/Kg recomendado por la Oficina Central del Gobierno de Hong Kong, usando esta referencia porque no hay normatividad en México para el cromo en peces. Su presencia en los tejidos fue en branquias > músculo > piel > hígado. El Cr hexavalente en peces marinos provoca problemas respiratorios y decoloración en sus tejidos

El Ba superó los 0.5 mg/kg recomendado por los CECA (SEDUE, 1989) para la protección de la vida acuática. No se tiene referencias del límite máximo permitido para peces. La presencia en los tejidos se registró en branquias > hígado > piel > músculo.

El Cu está por debajo el LMP que es de 32.5 mg/kg recomendado por la FAO (1983). En el hígado se encontró la mayor concentración y en el músculo la menor, no representa un riesgo para la salud humana.

Los metales analizados en este trabajo, con excepción del Cu, no son esenciales para las plantas, animales e incluso seres humanos, por lo tanto su presencia en los tejidos de *E. plumieri* y agua, aunado a que rebasan los límites máximos permitidos por la normatividad, indican que la Laguna de Tampamachoco, Veracruz presenta contaminación por metales pesados.

## XII. RECOMENDACIONES

- 1.- Los resultados de este trabajo sugieren realizar más estudios en la laguna, los cuales deben ser más continuos en tiempo y más prolongados, así como incluir más sitios de muestreo que representen toda la laguna.
- 2.- Que la medición de las variables fisicoquímicas se realicen a diferentes profundidades y se consideren otras variables como por ejemplo, nutrientes, clorofila- a y las corrientes.
- 3.-Ampliar el tipo de muestras a otros grupos de organismos, que intervienen en los diferentes niveles tróficos para poder establecer si existe bioacumulación de metales pesados en la cadena alimenticia.
- 4.- Que se realicen simultáneamente análisis en agua, sedimento y organismos.
- 5.- Se sugiere que los próximos estudios se consideren sitios de muestreo en el río, en la laguna y la desembocadura del río al mar, donde se comunican los tres cuerpos de agua para poder establecer si los metales pesados solo se encuentran en la laguna o si provienen del río o el mar.

### XIII.BIBLIOGRAFÍA

- Abascal, F. J., J. Cosson y C. Fauvel. 2007.Characterization of sperm motility in sea bass: the effect of heavy metals and physicochemical variables on sperm motility. *Journal of Fish Biology* 70:509-522.
- Acosta, V., C. Lodeiros, W. Senior y G. Martínez. 2002. Niveles de metales pesados en sedimentos superficiales en tres zonas litorales de Venezuela. *Interciencia* 27(12):686-690.
- Albert, L. 1999. Curso Básico de Toxicología Ambiental Noriega Editores. México. pp. 310.
- Andra, S. S., D. Sarkar, R. Datta, S. Saminathan, 2006. Lead in Soils in Paint Contaminated Residential Sites at San Antonio, Texas, and Baltimore, Maryland. *Bull Environmental Contamination and Toxicology*, USA, **77**: 643-650.
- Andreji, J. y I. Strañai. 2004. Levels of cobalt, nickel, cooper, and manganese in fishes from the Danube River, *Lucrari Stiinfice Zootehnie si Biotehnologii*, Vol. XXXVII Timisoara.
- Arcega-Cabrera, .F., S.E. Castillo-Blum y M. A. Armienta. 2005. Kinetic Study of the Release of Lead in a Mine-Impacted Tropical River, Mexico, *Bull Environmental Contamination and Toxicology* 75:523-529
- Atchinson, G. J., B. R. Murphy, W. E. Bishop, A. McIntosh, R.A. Mayes 1977. Trace metal contamination of bluegill (*Lepomis macrochirus*) from two Indiana lakes. *Trans American Fish Soc.*106:637-640. *En*: Barlas, N., N. Akbulut, M. Aydogan, 2005. Assessment of heavy Metal Residues In the Sediment and Water Samples of Uluabat Lake, Turkey. *Bull. Environmental Contamination and Toxicology* **74**:286-293.
- ATSDR. 1999. Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. (Reseña Toxicológica del Mercurio. Atlanta, GA: Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE. UU., Servicio de Salud Pública, 661 pp.
- ATSDR. 2004. Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. Reseña Toxicológica del Cobre. Atlanta, GA: Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE. UU., Servicio de Salud Pública, 262 pp..

- ATSDR. 2007. Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. Reseña Toxicológica del Bario y Compuestos de Bario. Atlanta, GA: Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE. UU., Servicio de Salud Pública, 179 pp.
- ATSDR. 2007. Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. Reseña Toxicológica del Plomo. Atlanta, GA: Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE. UU., Servicio de Salud Pública, 523 pp.
- ATSDR. 2008a. Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. (Reseña Toxicológica del Cromo. Atlanta, GA: Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE. UU., Servicio de Salud Pública, 616 pp.
- ATSDR. 2008b. Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. Reseña Toxicológica del Cadmio. Atlanta, GA: Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE. UU., Servicio de Salud Pública, 449 pp.
- Báez, A.P., Nulman, R., Rosas, I. and Gálvez, L. 1976. Aquatic organism contamination by mercury residues in the Coatzacoalcos River Estuary, México. International Atomic Energy Agency. Viena, pp. 73-78.
- Barlas, N., N. Akbulut, M. Aydogan. 2005. Assessment of heavy Metal Residues. En the Sediment and Water Samples of Uluabat Lake, Turkey. Bull Environmental Contamination and Toxicology **74**: 286-293.
- Basáñez, M. A. J. 2005. Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar (FIR). Manglares y Humedales de Tuxpan. Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. Universidad Veracruzana, Km 7.5 Carretera Tuxpam-Tampico. Col Universitaria, Tuxpan, Veracruz, México.pp.1-14
- Bertini K. K. y E. D. Goldberg. 1971. Fossil fuel combustion the mayor sedimentary cycle. Science 178, 233-235. En Villanueva, F. S. y A.V. Botello. 1992. Metales pesados en la zona costera del Golfo de México y Caribe Mexicano. Una revisión. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 8(1):47-61.
- Botello A.V., E. Hicks, E. F. Mandelli, 1976. Estudios preliminares sobre los niveles de algunos contaminantes en la laguna de Términos, Camp., México. Simposio sobre adelantos en

- las investigaciones marinas en el Caribe y regiones adyacentes. Caracas 12-16 de Julio, 1976 . FAO, pp. 267-280.
- Botello, A.V. y F. Páez-Osuna, 1986. La contaminación. El problema crucial. Centro de Ecodesarrollo, Vol. I, México, pp. 62-85.
- Botello, A.V., S.Villanueva y F. Páez- Osuna, 1988. Evaluación de algunos metales pesados en organismos del Río Coatzacoalcos y de la laguna del Ostión, Ver., México. *Contam. Ambient.* 4:19-31.
- Botello, A.V. 1995. Contaminación por hidrocarburos y metales pesados. P 27-29; 215-230. *En:* A. Botello (Responsable) Evaluación Geoquímica Ambiental y Diagnosis de la zona costera de Veracruz: Lagunas de Tamiahua, Pueblo Viejo y Tampamachoco. Informe final de Proyecto de investigación CONACYT 3232-T9308. 45 p.
- Botello, A.V. 1996. Hidrocarburos Tóxicos en cuerpos acuáticos y su Bioacumulación.
- Botello, A.V., S. F. Villanueva y L. H. Rosales. 2004. Distribución y contaminación de metales en el Golfo de México. pp. 683-712. *En:* Caso, M., I. Pisanty y E. Ezcurra. 2004. (Eds). Diagnóstico ambiental del Golfo de México. Publicado por Instituto Nacional de Ecología, pp. 681-710.
- Broecker, W.S. 1974. *Chemical Oceanography*, Harcourt Brace Jovanovich, Inc., USA. 214 p.
- Cabral, H.; Costa, M.; Salgado, P. 2001 Does the Tagus estuary fish community reflect environmental changes? *Clim Res.* 18: 119-126.
- Cairns, M.A. Y R.R. Garton, 1982. Use of fish ventilation frequency to estimated chronically safe toxicant concentrations. *Transaction of American Fisheries Society*, 111: 70-77.
- Castro-Aguirre, J.L. 1987. Estudios hidrobiológicos del sistema estuarino-lagunar Tuxpan-Tampamachoco, Veracruz. Zona noroccidental del Golfo de México. UAM-X(ed). Distrito Federal. 227 pp.
- Carwardine, M., E. Hoyt, R. W. Fordyce y P. Gill. 2006. Contaminación y efectos sobre los cetáceos. *Apnea: delfines y ballenas* 6:12-18.
- Cervantes, C., y R. Moreno. 1999. Contaminación Ambiental por metales pesados. Impacto en los seres vivos. Edit. AGT Editor, S.A. pp. 1-39
- Chandrajith, R. y M. Okumura. 1996. Geochemistry of mercury in sediments from Lake Biwa in Japan, *Lakes and Reservoirs: Research and Management* 2: 181-186

- Chávez O., E. A. 1967. Estudio ecológico parcial de un sistema estuarino en la costa oriental de México. Res. III Congr. Nal. Oceanogr. En: L. O. Castañeda y F. Contreras. 2001. Ecosistemas costeros mexicanos. CO ROM, UAM-I, México.
- Codina, J.C., y A. Pérez, 2006. Los metales pesados como polucionantes tóxicos. Universidad de Málaga, España. Facultad de Ciencias. En: Goldaracena, I. C., 2007. Metales pesados en organismos acuáticos en dos lagunas costeras del sur de Tamaulipas y norte de Veracruz, Tesis de Maestría. Instituto Politécnico Nacional, 90 p.
- Consejo Nacional de Población. 2000-2005. Índices de marginación.
- Contreras, F. 1983. Biótica, variaciones en la hidrología y concentraciones de nutrientes del área estuarino-lagunar de Tuxpan, Tampamachoco, Veracruz México. pp. 201-213.
- Contreras, E. F. 1985. Las Lagunas Costeras Mexicanas. Centro de Ecodesarrollo. Secretaría de Pesca. 2ª Ed. México. pp.263
- Contreras E.F. y Gutiérrez, F.M. 1990. Hidrología, nutrientes y productividad primaria en lagunas costeras. *En:* de la Rosa-Vélez, J. y F. González-Arias. (Eds). Temas de Oceanografía Biológica en México. Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada. pp. 57-78.
- Courtney, L. A. y W. H. Clements.2002. Assessing the influence of water and substratum quality on benthic macroinvertebrate communities in a metal-polluted stream: an experimental approach, *Freshwater Biology* 47:1766–1778.
- Deacon, J. R., Driver N. E., 1999. Distribution of trace elements in streambed sediment associated with mining activities in the upper Colorado River Basin, Colorado, USA, 1995–96. *Archives of environmental Contamination and Toxicology* 37,7-18.
- De la Lanza-Espino, G., Sánchez, S.N. y Esquivel, H. A. 1998. Análisis temporal y espacial fisicoquímico de una laguna tropical a través del análisis multivariado. *Hidrobiológica* 8(2): 89-96.
- Departamento de Pesca. 1977. Monografía del puerto de Tuxpan, Veracruz. 30 p.
- Environmental Protection Agency (EPA), 2006. Lead in Pain, Dust and Soil.
- Ersen, L. Z. Kragelj. 2006. Cadmium Concentrations in Blood in a Group of male Recruits in Slovenia Related to Smoking Habits. *Environmental Contamination and Toxicology, Slovenia*, 76: 278-284.

- Espina, S. y C. Vanegas, 2005. Ecotoxicología y contaminación, p. 79-120. En: Botello, A.V., J. Rendón – von Osten, G. Gold- Bouchot y C. Agraz – Hernández (Eds). Golfo de México Contaminación e Impacto ambiental: Diagnóstico y Tendencias, 2da Edición. Univ. Auton. de Campeche, Univ. Nal. Auton, de México, Instituto Nacional de Ecología. 696 p.
- FAO, 1983. Manual de métodos de investigación del medio ambiente acuática. Documentos técnicos de pesca, nº 212. Parte 9. Análisis de presencia de metales y organoclorados en peces.
- Farkas, A., J. Salanki y I.Varanka. 2000. Heavy metal concentrations in fish of Lake Balaton, Lakes & Reservoirs: Research and Management 5:271–279.
- Food and Drug Administration (1978). Fed. Reg. Ref. CPG 7108.07
- Frías-Espericueta, M.G., J.I. Osuna-López, S. Flores-Reyes, G. López-López y G. Izaguirre-Fierro. 2005. Heavy Metals in the Oyster *Crassostrea corteziensis* from Urias Lagoon, Mazatlan, México Associated with Different Anthropogenic Discharges. Bulletin of Environmental, Contamination and Toxicology. 74:996-1002.
- Fuentes-Mata, P. 1991. Diversidad ictiofaunística en sistemas lagunares de México, p. 66-73. In M. G Figueroa, C. Álvarez, A. Esquivel & M. E. Ponce (eds.). Físico-química y biología de las lagunas costeras mexicanas. DCBS, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, México, D.F. Serie Grandes Temas de la Hidrobiología 1.
- García, E. 1971. Los climas del Estado de Veracruz (según el sistema de clasificación climática de Köppen modificado por la autora). Anales del Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, Serie Botánica. 41(1):3-42.
- Goldaracena, I. C., 2007. Metales pesados en organismos acuáticos en dos lagunas costeras del sur de Tamaulipas y norte de Veracruz, Tesis de Maestría. Instituto Politécnico Nacional, 90 p.
- González, L., R. Méndez, V. López y B. Vázquez. 2006. Evaluación de la contaminación en sedimentos del área portuaria y zona costera de Salina Cruz, Oaxaca, México. Interciencia, Caracas, Venezuela. pp 647-656
- Gorski, J. y D Nugegoda. 2006. Toxicity of Trace Metals to Juvenile Abalone, *Haliotis rubra* Following Short-Term Exposure. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology. 77:732-740.

- Guzmán, A. P., S. F. Villanueva y A.V. Botello. 2005. Metales en tres lagunas costeras del estado de Veracruz, p.361-372. *En*: A.V. Botello, J. Rendón von Osten, G. Gold-Bouchot y C. Agraz Hernández (Eds). Golfo de México Contaminación e Impacto ambiental: Diagnostico y Tendencias, 2da Edición. Univ. Auton. de Campeche, Univ. Nal. Auton. de México, Instituto Nacional de Ecología. 696 p.
- Guentzel, J., E. Portilla, K. M .Keith y E.O. Keith.2007. Mercury transport and bioaccumulation in riverbank communities of the Alvarado Lagoon System, Veracruz State, Mexico. *Science of the Total Environment*, 388:316-324.
- Heiny, J. S., Tate, C. M., 1997. Concentration, distribution, and comparison of selected trace elements in bed sediment and fish tissue in the South Platte River Basin, USA, 1992–93. *Archives of environmental Contamination and Toxicology* 32, 246-259.
- Hernández, A.E., 1994. Determinación de metales en agua, sedimento y biota de la laguna de Mandinga, Ver. México. Servicio Social. Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa. Ciencias Biológicas y de la salud, 34 p.
- Huang, W. B. 2003. Heavy metal concentrations in the common benthic fishes caught from the coastal waters of Eastern Taiwan, *Journal of Food and Drug Analysis*, 11(4):324-330.
- INEGI. II Censo de Población y Vivienda 2005.
- INGGO. 1980. Bioacumulación de metales pesados y plaguicidas en especies acuáticas de importancia económica. SARH Direc. Gral. de Protección y Ordenamiento Ecológico, México, D.F. 38 p.
- Kennish, M. J. 1986. *Ecology of estuaries*, volumen I: Physical and chemical aspects. CRC Press, Inc., Florida, USA. p. 577.
- Khaniki, G.R.J., I. Alli, E. Nowroozi y R. Nabizadeh.2005. Mercury contamination in fish and public health aspects: a review. *Pak J. Nutr* 4(5):276–281.
- Kochhann, D., A.P. S. Benaduce, C. E. Copatti, K.R. Lorenzatto, M. F. Mesko, E. M. Flores, VL. Dressler y B. Baldisserotto. 2009. Effects of Chronic Waterborne Cadmium Exposure on the Detection of Alarm Cues by Juvenile Silver Catfish (*Rhamdia quelen*), *Arch Environ Contam Toxicol* 56:770–775.
- Laws, E. A. 1993. *Metals*, *En*. Aquatic Pollution. An Introduction Text Second Edition. An Intercience Publication. John Wiley and Sons, Inc. pp. 351-415.

- Linnik, M. y I. Zubenko. 2000. Role of bottom sediments in the secondary pollution of aquatic environments by heavy metal compounds, *Lakes & Reservoirs Research and Management* 5:11-21.
- Lokeshwari, H. y G.T. Chandrappa. 2007. Effects of heavy metal contamination from anthropogenic sources on Dasarahalli tankl, India., *Lakes & Reservoirs Research and Management* 12:121-128.
- Luna J.M., J. Rendón-von O., L. Alpuche. 2002. Presencia de plomo en agua y ostión en las lagunas de Alvarado y la Mancha. p. 145-154. In: La pesca en Veracruz y sus perspectivas de desarrollo. Instituto Nacional de la Pesca y Universidad Veracruzana.
- Macías, Z.J.V., J.A. Villaescusa, B. A. Muñoz y B. G. Gold. 1999. Trace metals in sediment cores from the Campeche shelf, Gulf of Mexico. Elsevier Science Ltd. *Environmental Pollution* 104 (1), 69-77.
- Mancera-R., N. J y L. R. Álvarez 2006. Estado del conocimiento de las concentraciones de mercurio y otros metales pesados en peces dulceacuícolas de Colombia, *Acta Biológica Colombiana*, 11(1):3 – 23.
- Mandelli, E. F. 1979. Contaminación por metales pesados. *Rev. Com. Perm. Pacífico Sur* 10, pp. 209-228.
- Mee, J. D. 1978. Coastal lagoons. In: J.P. Riley and R. Chester (Eds). *Chemical Oceanography*. Academia Press. New York, USA. pp. 441- 490.
- Méndez U., M. N. 1989. Anélidos poliquetos en sedimentos de la laguna de Tampamachoco, Ver., México. *Res. X Congr. Nal. Zool.* 83. En: L. O. Castañeda y F. Contreras E. 2001. *Ecosistemas costeros mexicanos*. CO ROM, UAM-I, México.
- Murano, H., K. Matsuzaki, H. Shiraishf y M. Wakabayashi. 2007. Effects of heavy metals in river waters in Japan on immobility and mortality of *Daphnia magna* and *Oryzias latipes* larvae, *Fisheries Science*; 73:1078-1086.
- Nauen, C.E. 1983. Compilation of legal limits for hazardddous substances in fish and fishery products. Food and Agriculture Organization of the United Nations, *FAO Fisheries Circular No. 764, FIRI/C764, Roma*, 42 p.
- NOM: NMX-AA-051-SCFI-2001, Análisis de aguas, Determinación de metales por el método espectrofotométrico de absorción atómica.

- NOM 242-SSA-1-2009. Productos y servicios. Productos de la pesca, frescos, refrigerados, congelados y procesados. Especificaciones sanitarias y métodos de prueba.
- NOM- 001-ECOL-1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.
- NOM-001-SERMANAT-1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.
- NOM-027-SSA1-1993. Bienes y servicios. Productos de la pesca. Pescados Frescos, refrigerados y congelados. Especificaciones sanitarias.
- Ochieng, E. Z., J.O. Lalah, S.O. Wandiga, 2006. Heavy Metals in Water and Surface Sediments in Winam Gulf of Lake Victoria, Kenya. *Environmental Contamination and Toxicology* **77**: 459-468.
- Odum, E. 1986. Fundamentos de Ecología, Ed. CECSA. México. 472p.
- Páez-Osuna, F. 1996. Efectos de los metales. *En*: A.V. Botello, J.L. Rojas-Galaviz, J.A. Benítez y D. Zárate-Lomelí (Eds.). *Golfo de México, Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y Tendencias*. Universidad Autónoma de Campeche. EPOMEX, Serie Científica, 5. pp 349-361
- Páez-Osuna, F. 2005. Fuentes de metales en la zona costera marina, p.329-342. *En*: Botello, A.V., J. Rendón – von Osten, G. Gold- Bouchot y C. Agraz – Hernández (Eds). *Golfo de México Contaminación e Impacto ambiental: Diagnóstico y Tendencias*, 2da Edición. Univ. Auton. de Campeche, Univ. Nal. Auton, de México, Instituto Nacional de Ecología. 696 p.
- Pham N. T. T., A. Pulkownik y R.T. Buckney.2007, Assessment of heavy metals in sediments and aquatic organisms in West Lake (HoTay), Hanoi,Vietnam. *Lakers & Reservoirs Research and Management* 2007 12:285-294.
- Pardos, M., CH. Benninghoff, L. F de Alencastro y W. Wildi.2004. The impact of a sewage treatment plant's effluent on sediment quality in a small bay in Lak Geneva (Switzerland-France). Part 1: Spatisl distribution of contaminants and the potential for biological impacts. *Lakes and Reservoirs: Research and Management* 9: 41-52.
- Pérez, H. M., F. Contreras, E. Ducoing y A.García.1994. Ictiofauna, hidrología, productividad y algunos parámetros de contaminación de la Laguna de Tampamachoco, Ver. Informe Final del Proyecto de Investigación Interdepartamental División C.B.S. UAMI 234 p.

- Pérez-Zapata. A.J., I.R. Deleón y R.A.M. Gil. 1984. Determinación cuantitativa de plomo en peces del estuario del Río Coatzacoalcos. *Anales de la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas México*. 28:193-197.
- Pérez- Zapata A.J. 1981. Plomo y mercurio. En Lagunas costeras de Tabasco. Un Ecosistema en peligro. Centro de Ecodesarrollo, México, pp. 58-61.
- Ponce, V.G. 1995. Evaluación de los niveles de metales pesados e hidrocarburos aromáticos polinucleares en la zona costera del Golfo de México. Tesis de Maestría. Fac. de Ciencias, UNAM.
- Prieto, M.J., González, R. C.A., Román, G. A.D y Prieto, G.F. 2009. Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* Vol. 10, Num.1, pp. 29-44. Universidad Autónoma de Yucatán. México.
- Rainbow, P. (1995). Biomonitoring of heavy metal availability in the marine environment. *Mar. Poll. Bull.* 31 (4-12): 183-192.
- Reguero, M. A. García- Cubas y G. Zúñiga. 1991. Moluscos de la laguna de Tampamachoco, Veracruz, México: sistemática y ecología. *An. Inst. Cienc. Del Mar y Limnol. Univ. Nal. Auton. México*. 18(2):289-328.
- Reséndez, A. & A. Kobelkowsky. 1991. Ictiofauna de los sistemas lagunares costeros del Golfo de México, México. *Universidad y Ciencia* 8: 91-110.
- Romo-Gómez, C., 2010. Evaluación de algunos hidrocarburos aromáticos policíclicos y metales pesados en agua, sedimento y *cyprinus carpio* Linnaeus, 1758, del Lago de Tecocomulco, Hidalgo. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Tesis de Doctor en Ciencias Ambientales. 140p.
- Rosas, I., A. Báez, y R. Belmont. 1983. Oyster *Crassostrea Virginica* as indicator of heavy metal pollution in some Lagoons of the Gulf of México, *Water, Air and Soil Pollution*, 20:127-135.
- Rosales, L., A. Carranza, S. Santiago, C. Méndez and R. Doler. 1994. Study of anthropogenically induced trace metals on the continental shelf in the southeastern part of the Gulf of Mexico. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 10:9-13.

- Ruiz-Marín, A., Campos-García, S., Zavala-Loria, J., Canedo-López, Y. 2009. Hydrological aspects of the lagoons of atasta and pom, Mexico. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 10(1):63-74.
- Saha, M., A. Cobelo-García, S.K. Sarkar, R. Prego, B. Bhattacharya. 2006. Distribution of Metals in Representative Biota of Sundarban Mangrove Wetland, Northeast India. *Bulletín Environmental Contamination and Toxicology, India*, **76**: 656-662.
- Secretaría de Desarrollo Agropecuario, Forestal y Pesquero (SEDAP). 1997. Plan Estratégico para el desarrollo de la acuicultura en el estado de Veracruz General de Pesca. Veracruz, México. Síntesis Ejecutiva. 10 pp.
- Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE). 1989. Acuerdo por el que se establecen los Criterios ecológicos de calidad de agua CE-CCA -001/89. Publicado en el Diario Oficial de la Federación del 2 de Diciembre del 1989. Tomo CDXXX, No. 9. México, D.F.
- Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología. 1990. *Gaceta Ecológica*. Vol.II, No.6, Enero de 1990, 64 p.
- Shrivastava, P., A. Saxena y A. Swarup. 2003. Heavy metal pollution in a sewage-fed lake of Bhopal, (M.P.) India, *Lakes and Reservoirs: Research and Monagement* 8:1-4.
- Shumilin, E., A. Meyer-Willerer, A.J. Marmolejo- Rodríguez, O. Morton-Bermea, M.A. Galicia-Pérez, E. Hernández, G. González-Hernández. 2005. Iron, Cadmium, Chromium, Copper, Cobalt, Lead, and Zinc Distribution in the Suspended Particulate Matter of the Tropical Mabarasco River and its Estuary, Colima, Mexico. México, *Environmental Contamination and Toxicology* ,**74**: 518-525.
- Sobrino, F. A., A.V. Botello y F. S. Villanueva. 2005. Efectos de Compuestos Genotóxicos de Tres Sistemas Costeros de Veracruz, p.141-155. *En*: A.V. Botello, J. Rendón-von Osten, G. Gold- Bouchot y C. Agraz-Hernández (Eds). *Golfo de México Contaminación e Impacto ambiental: Diagnostico y Tendencias*, 2da Edición. Universidad Autónoma de Campeche, Univ. Nal. Auton, de México, Instituto Nacional de Ecología 696 p.
- Storelli, M.M., G.Barone, A. Storelli y G.O. Marcotrigiano. 2006. Trace Metals in Tissues of Mugilids (*Mugil auratus*, *Mugil capito*, and *Mugil labrosus*) from the Mediterranean Sea. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 77:43-50.

- Suicmez, M., M. Kayim, D. Koseoglu y E. Hasdemir. 2006. Toxic Effects of lead on the Liver and Gills of *oncorhynchus mykiss* WALBAUM 1792, *Environmental Contamination and Toxicology*, 77:551-558.
- Toledo, O. A. 2005. Marco Conceptual: Caracterización ambiental del Golfo de México p. 25-52. *En*: A.V. Botello, J. Rendón–von Osten, G. Gold- Bouchot y C. Agraz – Hernández (Eds). *Golfo de México Contaminación e Impacto ambiental: Diagnóstico y Tendencias*, 2da Edición. Univ. Auton. de Campeche, Univ. Nal. Auton, de México, Instituto Nacional de Ecología. 696 p.
- Ui, J. y Kitamura S. 1971. Mercury pollution of sea and fresh water: Its accumulation into water biomass. *J. Fac. Engineering, Uni. Tokyo (B)* 31: 271-305.
- Vázquez, F.G., M. Sánchez, H. Alexander y D. Delgado. 1991. Distribution of Ni and Vanadium Petroleum hydrocarbons in recent sediments from the Veracruz coast, Mexico. *Bulletin Environmental Contamination and Toxicology* 46:774-781.
- Vázquez, F.G., Sharma, V.K., Alexander, V.H, y C.A. Fraustro, 1995. Metals in some lagoons of Mexico *Environ. Health perspect* 103:3334 p.
- Vázquez, F.G., V.K.Sharma, Q.A. Mendoza y Hernández R. 2001. Metals in fish and shrimp of the Campeche Sound, Gulf of Mexico. *Bulletin Environmental Contamination and Toxicology*, 46, 774-781. Springer-Verlag New York Inc.
- Vázquez, F.G., V.K. Sharma y C. Pérez, 2002. Concentrations of elements and metals in sediments of the southeastern Gulf of Mexico, *Environmental Geology*, 42, 41-46, Springer-Verlag, New York Inc.
- Villanueva, F.S., A.V. Botello y O.F. Páez, 1988, Evaluación de algunos metales pesados en organismos del río Coatzacoalcos y de la Laguna del Ostión, Veracruz, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, año/vol. 4, número 001. Universidad Nacional Autónoma de México. p 20
- Villanueva, F. S. y A.V. Botello. 1992. Metales pesados en la zona costera del Golfo de México y Caribe Mexicano. Una revisión. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 8(1):47-61.
- Villanueva, F. S., y A.V. Botello. 1998. Metal Pollution in coastal areas of México. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 157: 53-94

- Villanueva, E. R.E. 2000. Evaluación de metales pesados en el área de las plataformas petroleras de la Bahía de Campeche. Tesis de Maestría. Posgrado en Ciencias del Mar. ICMYL-UNAM.
- Villanueva, F.S. y Botello, A.V. 2005. Vigilancia y presencia de metales tóxicos en la laguna Yucateco, Tabasco, México, P. 407-430. *In:* A.V. Botello, J. Rendón-von Osten, G. Gold-Bouchot y C. Agraz-Hernández (Eds.). Golfo de México Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y Tendencias, 2da. Edición. Univ. Autón. De Campeche, Univ. Nal. Autón. De México, Instituto Nacional de Ecología, 696 p.
- Voegborlo, R.B., D.A. Baah, E.E. Kwaansa-Ansah, A.A. Adimado. 2004. Mercury Concentrations in Fish Species from the Gulf of Guinea, Ghana. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 73:1057-1064.
- Wright, J. 2002. *Environmental Chemistry*. Routledge Publisher, United Kingdom, 320 pp.
- Wu, S.M. y A.N. Deng. 2006. Effect of Cadmium on Hematological Functions in Tilapia (*Oreochromis mossambicus*). *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 76:891-898
- Yáñez-Arancibia, A.1977. Piscicultura en Lagunas costeras: Perspectivas en México. *Simposium on progress in Marine Research in the Caribbean and Adjacent. Regions*, Caracas, Venezuela, pp 529-547.