

UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA



Fructificar la razón y trascender nuestra cultura

ANÁLISIS ESPACIO-TEMPORAL DE LAS CONCENTRACIONES DE METALES PESADOS (Cd, Cu, Fe, Pb y Zn), EN COLUMNA DE AGUA, SEDIMENTO Y EN LAS MACROALGAS, *Batophora* spp. y *Bostrychia* spp. EN LA BAHÍA DE CHETUMAL, QUINTANA ROO, MÉXICO.

TESIS

Que como requisito parcial para la obtención del título de:

INGENIERO AMBIENTAL

Presenta:

NIDIA EUNICE SÁNCHEZ POOL

Febrero de 2007, Chetumal, Quintana Roo, México,



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO

Trabajo de tesis elaborado bajo la supervisión del comité de asesoría y aprobado como requisito para obtener el grado de:

LICENCIADO EN INGENIERÍA AMBIENTAL

Comité:

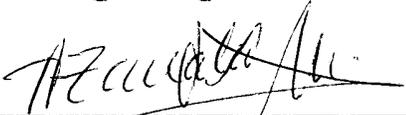
DIRECTOR:


M. C. Teresa Alvarez Legorreta

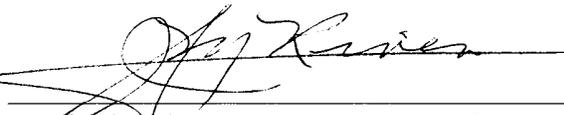
SUPERVISOR:


Dr. Victor Hugo Delgado Blas

SUPERVISOR:


Ing. Adriana Zavala Mendoza.

SUPERVISOR:


M.C. José Martín Rivero Rodríguez.

SUPERVISOR:


Dr. Julio Espinoza Avalos.

Chetumal, Quintana Roo, 15 de Febrero de 2005.

Dedicado a:

Dios, quien no me ha permitido caer y ha sido mi fortaleza durante todos estos años.

Mi familia; papá, mamá, Pedro, Ana, Marcial y Gianny, por todo el apoyo que en todo momento me han brindado.

Mis amigos incondicionales, Jasiel, Keila, Gaspar, José, Clarita, Lid, Pris, Fam. Avilés, Sisi y Jorge, ¿qué haría sin ustedes?

Agradecimientos.

A todos y cada uno de mis sinodales, por su gran paciencia y comprensión:

Maestra Tere, no tengo palabras para decirle cuando agradezco todo el tiempo que se tomó para este proyecto, todo el apoyo y comprensión que me brindó no sólo en lo profesional y sino también en lo personal a lo largo de todos estos años, será muy difícil de olvidar ¡Muchas gracias!.

Prof. Víctor, por recomendación suya me metí en este proyecto y también por sus palabras fue que me animé a concluirlo ¡Muchas gracias!

Adriana, cómo agradecerle cada palabra, cada consejo, toda la confianza que me brindaste, tu amistad. Mucho de lo que sé sobre el manejo de laboratorios es obra tuya, ¡eres una extraordinaria profesional y más importante aún, una magnífica persona!

Prof. Martín, no sólo debo agradecerle las molestias que se tomó para este proyecto y su preocupación para que lo concluyese, también debo agradecerle el hecho de haberme graduado de Ingeniero Ambiental, pues fueron sus palabras las que me hicieron tomar la decisión de no dejar esta carrera.

Dr. Julio, fue un honor haber trabajado, aunque sea tan poco, con usted, gracias por todos sus consejos y su tiempo.

Al Colegio de la Frontera Sur por abrirme sus puertas y brindarme el apoyo necesario para la realización de este proyecto.

A los compañeros de ECOSUR, en la primera parte; Denisse, no sé que habría hecho sin toda su ayuda y recomendaciones, Claudia, Luis y Sandra, Liz, su ayuda en los muestreos y sus respuestas a todas mis dudas fueron invaluable. En la segunda parte, Marleny; fuiste una amiga y compañera maravillosa. A todos ellos ¡Mil gracias!

Al Departamento de Bentos, en especial al Dr. Sergio Salazar, gracias por todas sus recomendaciones, observaciones y su apoyo, ¡qué distinción que comentaran mi trabajo!

A todos mis profesores del área de Ingeniería de la UQROO que me impartieron clases, gracias por sus enseñanzas, parte de lo que soy ahora, se los debo a ustedes.

Un agradecimiento especial al Prof. Juan Carlos y a la Maestra Araceli, gracias por animarme a concluir este proyecto.

A mis ex-compañeros de carrera.

A mis alumnos y compañeros de trabajo en Cobá, gracias por animarme a seguir adelante y superarme día con día;

Lic. Deysi, ¡gracias por todo el apoyo y facilidades para finalizar este proyecto!

Prof. Moguel y Profa. Lupita, ¡Gracias por los ánimos!

Rigo, ¡gracias por los ánimos y tu preocupación!

A la Fam. Cen Nah, son ustedes unas personas maravillosas, sus ánimos y su preocupación por mi superación personal y profesional y todo el apoyo y cariño que me brindan son invaluableles.

A todos aquellos que tuvieron una palabra de ánimo para que yo continuara y finalizara este documento ¡Gracias!

ÍNDICE GENERAL

| | Página |
|---|---------------|
| Resumen. | I |
| 1. Introducción. | 2 |
| 2. Marco Teórico. | 5 |
| 3. Antecedentes. | 11 |
| 4. Objetivos. | 14 |
| 5. Área de Estudio. | 15 |
| 6. Metodología. | 19 |
| 6.1 Campo. | 19 |
| 6.1.1 Procedimiento de muestreo. | 19 |
| 6.2 Laboratorio. | 20 |
| 6.2.1 Procedimiento de preparación de la muestra. | 20 |
| 6.2.2 Procedimiento de lectura de la muestra. | 21 |
| 6.2.3 Preparación de las curvas de calibración. | 22 |
| 6.2.4 Procedimiento de valoración del método utilizado. | 23 |
| 6.3 Análisis de Resultados. | 24 |
| 6.3.1 Cálculo del Factor de Bioconcentración (FBC). | 24 |
| 6.3.2 Análisis estadístico | 24 |
| 7. Resultados | 25 |
| 7.1. Variación Temporal. | 25 |
| 7.1.1 Agua. | 25 |
| 7.1.2 Sedimento. | 30 |
| 7.1.3 <i>Batophora</i> spp. | 35 |
| 7.1.4 <i>Bostrychia</i> spp. | 40 |
| 7.2 Variación Espacial. | 47 |
| 7.2.1 Agua | 47 |
| 7.2.2 Sedimento | 52 |
| 7.2.3 <i>Batophora</i> spp. | 57 |
| 7.1.4 <i>Bostrychia</i> spp. | 62 |
| 7.3 Factor de Bioconcentración. | 67 |

| | |
|---------------------------------------|-----------|
| 7.3.1 Variación Temporal. | 67 |
| 7.3.1.1 <i>Batophora spp.</i> /Agua. | 67 |
| 7.3.1.2 <i>Bostrychia spp.</i> /Agua. | 67 |
| 7.3.2 Variación Espacial. | 70 |
| 7.3.2.1 <i>Batophora spp.</i> /Agua. | 70 |
| 7.3.2.2 <i>Bostrychia spp.</i> /Agua. | 70 |
| 7.4 Correlación de Spearman. | 73 |
| 7.4.1 Variación Temporal. | 73 |
| 7.4.2 Variación Espacial. | 73 |
| 8.0 Discusión. | 75 |
| 9.0 Conclusiones. | 94 |
| 10.0 Literatura Citada. | 96 |

ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

| Tablas | Página |
|--|---------------|
| 6.2.1. Condiciones de operación del equipo de EAA. | 22 |
| 6.2.2. Porcentaje de recuperación de los metales en sedimento. | 23 |
| 7.1.1. Valores promedio de metales pesados en agua. Dos sitios. | 28 |
| 7.1.2. Valores promedio de metales pesados en sedimento. Dos sitios. | 33 |
| 7.1.3. Valores promedio de metales pesados en <i>Batophora</i> spp. Dos sitios. | 38 |
| 7.1.4. Valores promedio de metales pesados en <i>Bostrichya</i> spp. Dos sitios. | 43 |
| 7.2.1. Valores promedio de metales pesados en agua. Cinco sitios. | 50 |
| 7.2.2. Valores promedio de metales pesados en sedimento. Cinco sitios. | 55 |
| 7.2.3. Valores promedio de metales pesados en <i>Batophora</i> spp. Cinco sitios. | 60 |
| 7.2.4. Valores promedio de metales pesados en <i>Bostrichya</i> spp. Cinco sitios. | 65 |
| 7.3.1.1. Factores de Bioconcentración de <i>Batophora</i> spp. /agua. Dos sitios. | 69 |
| 7.3.1.2. Factores de Bioconcentración de <i>Bostrichya</i> spp. /agua. Dos sitios. | 69 |
| 7.3.2.1. Factores de Bioconcentración de <i>Batophora</i> spp. /agua. Cinco sitios. | 72 |
| 7.3.2.2. Factores de Bioconcentración de <i>Bostrichya</i> spp. /agua. Cinco sitios. | 72 |
| 7.4.1. Factor de Correlación de Spearman de Cd en agua, <i>Batophora</i> spp. y <i>Bostrichya</i> spp. Variación temporal. | 73 |
| 7.4.2. Factor de Correlación de Spearman, sedimento y <i>Batophora</i> spp. Variación temporal. | 74 |
| 8.1.1. Niveles de metales en aguas superficiales de áreas costeras del Golfo de México y Europa. | 79 |
| 8.2.1. Niveles de metales pesados en sedimentos de áreas no contaminadas. | 83 |
| 8.2.3. Niveles de metales pesados en sedimentos en la Bahía de Chetumal. | 84 |

| | |
|---|-----------|
| 8.3.1. Niveles de metales ($\mu\text{g/g}$) en <i>Batophora</i> spp. en la Bahía de Chetumal. | 87 |
| 8.4.1. Factores de Bioconcentración en varias algas | 92 |
| Figuras | |
| 5.1. Área de estudio y ubicación de los sitios de muestreo. | 18 |
| 7.1.1. Niveles de metales pesados en agua. Dos sitios. | 29 |
| 7.1.2. Niveles de metales pesados en sedimento. Dos sitios. | 34 |
| 7.1.3. Niveles de metales pesados en <i>Batophora</i> spp. Dos sitios. | 39 |
| 7.1.4. Niveles de metales pesados en <i>Bostrichya</i> spp. Dos sitios. | 44 |
| 7.2.1. Niveles de metales pesados en agua. Cinco sitios. | 51 |
| 7.2.2. Niveles de metales pesados en sedimento. Cinco sitios. | 56 |
| 7.1.3. Niveles de metales pesados en <i>Batophora</i> spp. Cinco sitios. | 61 |
| 7.1.4. Niveles de metales pesados en <i>Bostrichya</i> spp. Cinco sitios. | 66 |

RESUMEN

La Bahía de Chetumal, Quintana Roo, México, debido a sus características hidrológicas y geológicas, se ha visto afectada por diversos tipos de contaminación.

Se ha encontrado evidencia de contaminación química en el sedimento, lo cual probablemente este asociada a las actividades agrícolas y agroindustriales a lo largo del Río Hondo.

Este estudio analiza la variación espacial y temporal de los niveles de metales pesados (Cd, Cu, Fe, Pb y Zn) en columna de agua, sedimento y en las macroalgas, *Batophora spp.* y *Bostrychia spp.* en la Bahía de Chetumal.

Se realizaron dos muestreos en cinco sitios ubicados en la línea costera de la Bahía de Chetumal, durante la temporada de lluvias (octubre, 1999) y la temporada de secas (febrero, 2000) para analizar la variación temporal, así como muestreos mensuales (octu99/ene-mayo00) en dos de los cinco puntos.

La tendencia general de los metales fue la siguiente Fe>Zn>Pb>Cd>Cu, con variaciones en el orden del Cd y Cu, y en el caso del agua el Pb, presentó las más altas concentraciones.

El análisis espacio-temporal en cada uno de los compartimentos no mostró un patrón general específico, pero sí tendencia hacia la temporada de lluvias y aporte antropogénico.

Los valores encontrados, con excepción del Cd y Pb (para el agua) presentaron valores correspondientes a zonas no contaminadas.

No se encontró una relación clara entre los FBC encontrados y la variación espacio-temporal, no obstante sí se pudo observar que *Batophora spp.* acumula en mayor medida (valores y metales reportados) que *Bostrychia spp.*, sin embargo, únicamente ésta última podría ser considerada como bioindicadora de Cd ya que presentó consistencia en los valores calculados.

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación de los recursos hidrológicos es uno de los problemas ambientales más preocupantes que existen actualmente, siendo los contaminantes más importantes la materia orgánica; los fosfatos, los llamados metales pesados, el petróleo y sus derivados, los hidrocarburos clorados (DDT, PCB's) y otros materiales que afectan los ciclos biológicos acuáticos.

Los cuerpos de agua superficiales han sido empleados como vertederos de desecho y, aunque estas aguas generalmente tienen un alto grado de biodegradación, la tasa de adición puede exceder la capacidad de recuperación, por lo que el cuerpo de agua se contamina rápidamente, actuando como reservorio y acumulando contaminantes en el sedimento, en los organismos, disueltos en el agua o adheridos a partículas en suspensión (Goldberg, 1975).

La Bahía de Chetumal, se caracteriza por su escaso recambio de agua, lo cual promueve que sustancias externas a ella permanezcan por un mayor tiempo con los consecuentes efectos negativos en la fauna y flora acuática. Esta característica, asociada a los problemas crónicos de manejo de desechos, por parte de la Ciudad de Chetumal y las áreas vecinas, agrava la situación ambiental de la Bahía.

Lo que ha provocado que la Bahía presente problemas de contaminación derivados del vertimiento de estas aguas residuales municipales, el aporte de derivados de combustible, aceites y del uso de agroquímicos de la región agrícola del Río Hondo.

El problema alcanzó mayor notoriedad, no sólo en la sociedad quintanarroense, sino a escala nacional, con la muerte de miles de bagres de la especie *Arius assimilis*, ocurrida durante el mes de junio de 1996

Los estudios posteriores a este suceso mostraron la presencia de contaminantes en los sedimentos en una área extensa, lo cual señala un proceso de contaminación química de algunos sectores focales en la Bahía de Chetumal, lo que probablemente este asociada a las actividades agrícolas y agroindustriales

a lo largo del Río Hondo, involucrando a México y probablemente Belice (SEMARNAP, 1996)

Lo anteriormente mencionado realiza la importancia de la investigación de la calidad del agua de la Bahía de Chetumal, las zonas más afectadas por los contaminantes y con ello, obtener los conocimientos que permitan proponer soluciones al problema del deterioro ambiental de la Bahía de Chetumal.

Esta investigación se enfocó al estudio de la contaminación producida por metales (Cu, Cd, Fe, Pb y Zn) en el agua, sedimento y en dos macroalgas, *Bathophora* spp. y *Bostrychia* spp. mediante un análisis en las temporadas de lluvias y secas, en cinco puntos a lo largo de la línea costera de la Bahía de Chetumal.

El Cu, Zn, y Fe, son metales que son considerados esenciales para las algas, sin embargo, como ocurre con otros metales, en concentraciones excesivas, pueden llegar a representar daños para los organismos (Carell y Price, 1965; Turbachev, 1968; Rai, *et al*, 1981; Gledhill, *et al*, 1997, En: Rai *et al*, 1998).

A diferencia de estos tres metales, el Pb y Cd, no son esenciales para los organismos, sin embargo son conocidos los efectos que tienen sobre la salud humana y los organismos acuáticos (Forstener y Wittman, 1979 En: Villanueva y Botello, 1992; Davies, *et al*, 1976; Conway, 1978; Marshall y Mellinger, 1980; Hellawell, 1989 En: Páez-Osuna, 1996).

Bathophora spp. y *Bostrychia* spp. son macroalgas que han sido reportadas con una amplia distribución en la Bahía de Chetumal (Quan–Young, *et al*. 2000)

Bathophora spp. es un alga verde que suele hallarse en sustrato rocoso creciendo en grupos, de 3 a 10 cm de alto. En la bahía se halla en dos formas, *B. occidentalis* y *B. oerstedii*, en un principio solo ésta última había sido registrada para la Bahía (Huerta y Garza-Barrientos, 1980, Quan–Young, *et al*. 2000), sin embargo se realizó un análisis de sus características reproductivos, tales como el ancho de gametóforos y el diámetro de sus gametangios, lo que permitió diferenciar las dos formas (Jiménez–Flores, 2000; Gómez-Poot, 2000).

Bostrychia spp. es un alga parda que tiene una distribución similar a la de la *Bathophora* spp., ya que se encuentra también en el Caribe, y sur de Florida, esta

alga se caracteriza por hallarse en las raíces del mangle rojo *Rhizophora mangle* (Hillson, 1977).

Aunque existen antecedentes de la utilización de *Batophora oerstedii* en trabajos sobre presencia de metales, no se han encontrado antecedentes de la utilización de *Bostrychia* spp., por lo que se espera que este proyecto proporcione una base de datos que pueda servir como referencia en estudios posteriores sobre contaminación en la Bahía de Chetumal.

2. MARCO TEÓRICO

El incremento de la actividad antropogénica sobre la Tierra y con ésta, la industrialización y la alta demanda de diversos compuestos químicos sintéticos han acelerado la entrada de compuestos tóxicos al ambiente, contaminando los hábitats acuáticos y terrestres (Rai *et al*, 1998).

El concepto de contaminación marina, según Korringa (1982, En: Salazar-Vallejo, 1991) puntualiza la disparidad en el problema de la contaminación “natural” contra la antropogénica: “Es la introducción antropogénica de sustancias indeseables que dañan a los recursos vivos, perjudican la salud humana, impiden el desarrollo de actividades marítimas incluyendo la pesca, deterioran la calidad del agua para su uso, y reducen las posibilidades del uso de las áreas costeras como sitios de recreo”.

Los contaminantes acuáticos más importantes se pueden dividir en cinco grandes grupos: 1) material residual; 2) fosfatos y otros materiales que afectan los ciclos biológicos del mar; 3) metales pesados; 4) petróleo y sus derivados e 5) hidrocarburos clorados (DDT, PCB's).

Los metales pesados son un tipo especial de compuestos químicos los cuales tienen una densidad mayor a 5.0 g/cm^3 . Al contrario de otros compuestos químicos, los metales pesados no pueden ser eliminados de los cuerpos de agua y persisten en los sedimentos, donde son liberados gradualmente, penetrando la membrana biológica que separa a los organismos de su medio exterior, afectándolos de diversas formas (Rai *et al*, .., 1998).

Los efectos de los metales en aguas potables y residuales pueden ser beneficiosos, tóxicos o simplemente molestos. Algunos metales resultan esenciales, mientras que otros pueden perjudicar a los consumidores del agua, a los sistemas de tratamiento de aguas residuales y a las aguas de depósitos. En muchos casos el beneficio o riesgo potencial depende de la concentración (Eriksen *et al*, 1989).

En general, la disponibilidad de la mayoría de los metales para el metabolismo de las plantas depende de varios factores, como son el pH ya que la

mayoría de los metales traza son más tóxicos a las plantas en niveles bajos de pH; la concentración de nutrientes en lagos eutróficos presenta concentraciones locales muy altas de metales como resultado de la combinación del deterioro ambiental y las descargas municipales que contienen metales); el potencial Redox en la interfase sedimento-agua anóxica, exhibe típicamente un potencial negativo y liberación fácil de metales, por ejemplo, Fe, Cu, Zn, Cd; la salinidad en ambientes estuarinos, la disminución de las concentraciones de metales son parcialmente debidos a la competencia entre los cationes disueltos y los iones de metales pesados adsorbidos; la dureza del agua (algunos metales son más tóxicos a algunas especies de plantas en aguas suaves, aproximadamente 20 mg de $\text{CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$, que en aguas duras, aproximadamente 300 mg $\text{CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$, debido a que los carbonatos metálicos inorgánicos son menos tóxicos que otras especies del metal; en algunos experimentos realizados en laboratorio con algas muestran que la luz incrementa la toxicidad de los metales y la actividad microbiana incrementa la liberación de metales.

Otros factores físicos como la resuspensión por la acción de los vientos o por la actividad humana, y factores biológicos como la bioalteración, pueden favorecer la movilización de los metales traza.

Los herbicidas orgánicos, los detergentes aniónicos y el crecimiento en el uso de agentes sintéticos complejos como el ácido nitrilacético (NTA) en detergentes, puede influir en la solubilidad del metal y consecuentemente en su absorción por las plantas. Estos factores son muy importantes en la distribución de los metales en agua y sedimentos y por ende, en su disposición a las macrofitas acuáticas (Guilizzoni, 1991).

En México, estudios conducidos por más de 25 años en el Golfo de México y Pacífico Mexicano por diferentes investigadores, han demostrado altas concentraciones de Hg, Pb, Cd, Cr, Ni, y Zn, indicando que los problemas más graves producidos por la contaminación por metales ocurren en cuerpos de agua semiencerrados, particularmente en bahías, estuarios y lagunas costeras. Es en ellos, que los metales están disponibles en grandes cantidades, dependiendo básicamente de la naturaleza de los sedimentos y las características de las aguas.

A pesar de la política nacional con respecto al uso y manejo de los recursos costeros, los problemas de contaminación se incrementan críticamente. La relevancia de este hecho es aún mayor en un país con extensos litorales que se están abriendo a las posibilidades y alternativas de nuevos desarrollos (Villanueva y Botello, 1998).

En México, la mayoría de los metales son ampliamente utilizados en las diversas actividades industriales que se realizan en las regiones costeras del Golfo de México, básicamente por las refinerías de petróleo, producción de fertilizantes, minería y metalurgia. En adición a éstos, los efluentes domésticos también son importantes fuentes de metales, debido a las descargas de aguas residuales enriquecidas con metales, tales como Ni, Cr, Pb, Zn, Cd y Ag, a los ríos (Páez-Osuna, 1996).

En el Pacífico Mexicano, el principal problema está representado más por los fertilizantes y menos por la industria petrolera (UNEP, 1985, En: Villanueva y Botello, 1998). De esta manera, los fertilizantes fosfatados son otra fuente importante debido a que contienen altos niveles de Cd, Mg, Fe y Zn.

Actualmente, la estimación de las concentraciones naturales y contribución antropogénica de metales, permiten la evaluación del nivel al cual un área es afectada. Para este propósito es importante el análisis de la columna de agua, así como en los sedimentos y organismos, especialmente aquellos organismos con hábitats bénticos y filtrantes, que han sido utilizados ampliamente como indicadores de contaminación (Rosas, *et al*, 1983; Vázquez, *et al*, 1990; Páez-Osuna, 1996; Villanueva y Paéz-Osuna, 1996, En: Villanueva y Botello, 1998)

En la actualidad hay un reconocimiento difundido de que los monitoreos químicos por sí solos no son suficientes y que la contaminación es esencialmente un fenómeno biológico, debido a que su impacto es en organismos vivos.

Las algas, debido a sus necesidades nutricionales y a su posición en la base de la cadena alimenticia acuática, proveen información relativamente única, concerniente a la condición del ecosistema, comparada con la que pueden proporcionar los indicadores animales comúnmente utilizados, ya que responden rápida y predeciblemente a un amplio rango de contaminantes y al mismo tiempo

proveen útiles señales de alarma sobre las condiciones de deterioro y sus posibles causas (McCormick y Cairns, 1994).

Las algas acumulan cantidades substanciales de metales debido a la vasta área superficial expuesta en su ambiente (Davis, 1978, En: Rai, *et al*, 1998). Aunque muchos de los metales pesados son esenciales para varios procesos metabólicos, éstos pueden llegar a ser tóxicos en altas concentraciones.

Las algas son sensibles al contenido de metal traza soluble en el ambiente que las rodea, sin embargo, no reflejan la carga total del metal, así como tampoco responden (o sólo responden débilmente e indirectamente) al metal asociado con la materia particulada orgánica e inorgánica. La integración de las concentraciones solubles del metal en el agua al ambiente respecto al tiempo, parece ser más alta en las macroalgas; esto es debido a la extremadamente larga vida media biológica de los metales (Rai, *et al*, 1998).

La habilidad de las macroalgas para reflejar la concentración soluble de los metales en su ambiente con un alto grado de integración de los metales con respecto al tiempo, es de importancia cuando se considera su conveniencia como indicador de contaminación por metales traza (Phillips, 1977).

Entre los metales que son necesarios para las algas, está el cobre, el cual es un elemento esencial del proceso metabólico en las algas marinas, siendo requerido para el transporte de electrones en la fotosíntesis y varios sistemas de enzimas (por ejemplo, aminoxidasa, citocromo cooxidasa), sin embargo en cantidades altamente superiores a las requeridas, es considerado uno de los metales más tóxicos para la algas marinas (Gledhill, *et al*, 1997).

Su toxicidad es atribuida principalmente al ion Cu (II), el cobre forma complejos fácilmente con una gran variedad de sustancias que se hallan tanto en aguas “limpias” y aquellas consideradas como contaminadas, también es adsorbido con cierta facilidad por el material suspendido (oxidihidróxidos de hierro y manganeso, minerales arcillosos y materia orgánica, entre otros).

Estas propiedades y las dificultades relacionadas con la separación de las especies químicas influyen y tienen que ver con la variabilidad de los resultados que se encuentran en la literatura (Paéz-Osuna, 1996).

El zinc es otro de los metales que también juega un papel importante en la actividad enzimática de las algas, en el mantenimiento e integración de los ribosomas (Rai, *et al*, 1981 En: Rai *et al*, 1998) y el transporte e integración de nutrientes (Rueter and Morel, 1981, En: Rai *et al*, 1998).

Además de su importancia en la actividad enzimática, el hierro es conocido por jugar un papel crucial en el crecimiento y reacciones de oxido-reducción en algas, así como en plantas superiores (Carell and Price, 1965, En: Rai *et al*, 1998), también está involucrado en la reducción de nitritos (Turbachev, 1968, En: Rai *et al*, 1998).

El plomo es uno de los metales más interesantes para los especialistas en metales, a diferencia de los metales anteriores, no es esencial para los seres vivos, sin embargo, existe en todos los órganos y tejidos de los mamíferos y es uno de los más movilizables por el hombre. Se presenta en dos estados de oxidación Pb^{2+} y Pb^{4+} , siendo el primero el que predomina en el ambiente acuático.

La mayoría de las sales del metal son muy poco solubles, de ahí que la toxicidad aguda sea imposible de observarse bajo condiciones naturales, al igual que otros metales su toxicidad está influida por la dureza de las aguas, pH y la presencia de materiales orgánicos entre otros.

Los efectos crónicos y agudos del plomo incluyen efectos histopatológicos, deformidades, neurotoxicidad, anemia, estos efectos ocurren en peces, aún en concentraciones tan bajas del elemento en el agua como de 8 $\mu\text{g/L}$ (Davies, *et al*, 1976, En: Páez-Osuna, 1996).

Su valor en los sedimentos de los ríos está en un intervalo de 10 $\mu\text{g/g}$ a 500 $\mu\text{g/g}$ para aquellos ríos que atraviesan áreas industrializadas y densamente pobladas (Nriagu y Coker, 1980, En: Villanueva y Botello, 1992).

De igual manera, su cantidad aumenta en sitios donde hay descargas de lodos de navegación o por el derrame de desechos industriales a los ríos, estuarios y lagunas costeras (Nelmes *et al*, 1974, En: Villanueva y Botello, 1992).

El cadmio, tampoco es un elemento esencial para los organismos, sus propiedades químicas son intermedias entre el zinc y el mercurio, está íntimamente relacionado con la materia coloidal como CdCl_2 y CdSO_4^- .

Las principales fuentes de cadmio en ambientes acuáticos resultan del lavado de los suelos agrícolas y de las descargas de la minería y a la industria. Otro origen importante son los desechos municipales y los lodos de las plantas de tratamiento (UNEP, 1985, En: Villanueva y Botello, 1992).

El cadmio se acumula en los tejidos de los organismos y se tiene conocimiento de que lesiona principalmente los mecanismos de regulación de los iones, más que afectar las funciones respiratorias o nerviosas (Hellawell, 1989, En: Páez-Osuna, 1996), su presencia en ambientes marinos disminuye la capacidad de sobrevivencia de larvas y estadios juveniles de peces, moluscos y crustáceos (Forstener y Wittman, 1979, En: Villanueva y Botello, 1992).

En estudios experimentales sobre el efecto del cadmio en el cultivo de algas diatomeas *Asterionella formosa*, se encontró que 2 mg/L del metal redujeron el crecimiento de éstas, mientras que poblaciones expuestas a más de 10 mg/L inhiben su crecimiento en un día (Conway, 1978, En: Páez-Osuna, 1996.)

En estudios de campo de comunidades de plancton se encontró que la fotosíntesis del fitoplancton y la producción primaria es reducida por concentraciones tan bajas del cadmio como 0.2 mg/L, y la comunidad del zooplancton es afectada en concentraciones de 5 mg/L o menos (Marshall y Mellinger, 1980, En: Páez-Osuna, 1996).

3. ANTECEDENTES

La Bahía de Chetumal ha sido objeto de diversos estudios que abordan de manera aislada aspectos variados de esta bahía, realizados por las diferentes instituciones existentes en la entidad.

La Secretaría de Marina ha realizado estudios sobre el efecto que causan las descargas de aguas negras y el drenaje pluvial sobre la vida bacteriana y planctónica en la zona colindante de la zona de Chetumal con su bahía, tomando como factor indicador las variaciones de algunos parámetros fisicoquímicos (Cano y Flores, 1989, 1990).

La Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, ha realizado análisis físico-químicos y bacteriológicos a partir de 1986, para el diagnóstico de la calidad del agua en la bahía de Chetumal y la influencia de las descargas directas e indirectas de aguas residuales provenientes de la ciudad (Chavira-Martínez *et al.*, 1992).

El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR), antes Centro de Investigaciones de Quintana Roo (CIQROO) ha realizado diversos estudios entre ellos un monitoreo de la contaminación de la Bahía de Chetumal (Ortiz y Saénz, 1995) y la evaluación del aporte de detergentes domésticos como factor contaminante en la zona urbana de la bahía (Ortiz y Saénz, 1996).

Después de la muerte masiva de los bagres ocurrida en 1996, se realizaron diversos estudios con la caracterización fisicoquímica de las aguas y sedimento de la bahía y la presencia de plaguicidas organoclorados en sedimento y bagres (ECOSUR, 1997)

Un estudio posterior se enfoca al efecto de material orgánico y la distribución de los coliformes fecales en la bahía (Ortiz y Saénz, 1999).

Noreña--Barroso, *et al.* (1998), determinó la concentración en sedimentos de hidrocarburos y plaguicidas organoclorados en la Bahía.

ECOSUR, realizó también diversos estudios para evaluar posibles organismos que pudieran servir como bioindicadores de contaminación, entre ellos los mejillones *Mitylopsis sallei* y *Brachidontes exustus* como indicadores de contaminación orgánica (Llanes-Baeza y Salazar-Vallejo, 2000), plaguicidas y

metales pesados (Alvarez–Legorreta, *et al*, 2000, se detalla más adelante); los poliquetos nereidos *Nereis sp* (González–Escalante y Salazar–Vallejo, 2000), también por contaminación orgánica. Así también se realizó un registro de la flora béntica existente en la bahía para conocer la existencia de algas que son consideradas indicadores de contaminación por materia orgánica y para proponer especies que por sus características pudieran ser utilizadas como tales (Quan–Young, *et al*, 2000).

En cuanto a estudios relacionados con la presencia de metales en la Bahía de Chetumal, se pueden mencionar cinco trabajos, en el primero se determinó la concentración de metales en hueso y sangre del manatí (*Trichechus manatus manatus*), pasto marino y algas (*Batophora spp.*, *Thalassia testudium*, *Ruppia maritima*, *Najas matina* y *Halodule wrightii*), detectándose 14 elementos (Ca, K, Na, Mg, Fe, Zn, Ni, Cr, Cu, Cd, Mn, Hg y Pb) en concentraciones bajas en comparación con otros lugares en el mundo (Rojas, 1997).

El segundo trabajo se realizó con motivo de la citada muerte masiva de bagres en la Bahía de Chetumal, (Alvarez–Legorreta y Sáenz-Morales, 1998), donde se realizó un análisis de los metales pesados en sedimento y se analizaron también los plaguicidas organoclorados. Se encontró que los valores de Cd, Cu y Pb fueron superiores a los encontrados en lagunas costeras del Golfo de México, con fuerte influencia petrolera e industrial, atribuyendo este hecho a tres posibles fuentes de contaminación en la Bahía; A) emisiones atmosféricas, vía el consumo de combustibles fósiles; B) el uso en la zona agrícola del Río Hondo de plaguicidas y fertilizantes que contienen metales como principio activo y C) los efluentes urbanos a través de la descarga de aguas residuales y la lixiviación de metales de los depósitos de basura y desechos sólidos. Se destaca la consideración realizada de que las especies estuarinas son más susceptibles que las marinas a la acción tóxica de los metales pesados.

El tercer trabajo se enfocó al estudio y análisis de la contaminación en la bahía, por medio de la evaluación de técnicas para la determinación de ortofosfatos (Pérez, 1999), el cual incluye la determinación de metales pesados en sedimento (Cu, Cd, Cr, Zn, Fe, Ni, Pb) como una determinación analítica

complementaria, encontrando una alta correlación entre la salinidad y el cobre, zinc, hierro y plomo; y la DQO y DBO, con las concentraciones de cobre, cromo, zinc y plomo. El hierro fue el metal que presentó mayor variación en todas las estaciones con mayor afectación antropogénica.

El cuarto estudio abordó la presencia de plaguicidas organoclorados y metales pesados en sedimentos y organismos bénticos de la bahía (Alvarez–Legorreta, *et al*,2000), en este estudio se analizó la posibilidad de la utilización de varios organismos, entre ellos el alga *Batophora oerstedii*, en donde se encontró que la concentración de contaminantes para organismos y sedimentos (con excepción del cadmio), se encuentran entre las áreas consideradas no contaminadas. Los niveles más altos, así como el mayor número de contaminantes los presentaron los mejillones. Se encontró una variación en la concentración de metales pesados de acuerdo al metal (se analizaron Cd, Cu, Fe, Pb y Zn) y la temporada (secas y lluvias).

El quinto trabajo corresponde a una evaluación de la distribución geoquímica de siete metales (Cd, Cu, Fe, Ni, Pb, V y Zn), y las posibles asociaciones que éstos formen con los diferentes componentes del sedimento, es decir la especiación de dichos metales, así como la acumulación de éstos en el tejido muscular del bagre *Arius assimilis* (García–Ríos y Gold–Bouchot, 2002). Uno de los aspectos más importantes de este trabajo fue que se encontró que las mayores concentraciones de los metales se encuentran incorporados a las estructuras minerales de los sedimentos, del 79 al 99 %, por lo que se hallan poco biodisponibles para los organismo, corroborándose lo anterior con las concentraciones de Pb y Cd, relativamente bajas que se encontraron en los bagres.

4. OBJETIVOS

General:

Analizar la variación temporal y espacial de los niveles de metales pesados en columna de agua, sedimento y en las macroalgas, *Batophora* spp. y *Bostrychia* spp. en la Bahía de Chetumal.

Específicos:

- * Determinar la concentración de Cd, Cu, Fe, Pb y Zn en columna de agua, sedimento y en las macroalgas, *Batophora* spp. y *Bostrychia* spp.
- * Determinar el factor de bioconcentración de los metales para cada una de las macroalgas, con respecto al agua.
- * Determinar si existe una relación espacio-temporal entre la concentración de metales pesados en el agua, el sedimento, y el factor de bioconcentración de las algas *Batophora* spp., y *Bostrychia* spp.

5. ÁREA DE ESTUDIO

La Bahía de Chetumal (Figura 5.1), es un extenso (ca. 1098 km²) sistema costero de tipo y origen cárstico (Contreras, 1985). Es un estuario de baja productividad (Gasca y Castellanos, 1993), con escasa influencia marina y elevados aportes de agua dulce. También se le considera un sistema de baja energía (Lankford, 1977, En: Suárez, 1994), con débiles corrientes internas originadas por la acción de vientos alisios del este y sureste, la velocidad promedio de los vientos es 3 m/s durante todo el año.

La bahía presenta bajas salinidades (2-26 ‰) y temperaturas de 25 a 32° C, los valores de oxígeno disuelto son cercanos a 6.19 mg/L y los de pH se ubican entre 6.3 y 9.0, con un promedio de 7.64 (Chavira-Martínez et al. 1992).

El clima de la región es del tipo Aw (X') y Aw2 (X''), cálido subhúmedo con lluvias desde junio hasta septiembre, la precipitación media es de 1300 mm anuales (González, 1985; Cano y Flores, 1989).

Los sedimentos en la mayor parte de la Bahía son limos excepto en el margen costero donde predominan el material terrígeno con un 90% de carbonato de calcio (Wantland, 1969, En: Gasca y Castellanos, 1993).

Los terrenos circundantes en su mayor parte son bajos y cubiertos de flora selvática de altura media, grandes extensiones de estos terrenos son pantanosos y en muchos sitios forman charcos permanentes. Los litorales de la Bahía son muy irregulares; carecen de playa y están rodeadas de manglares de las especies *Rhizophora mangle* y *Conocarpus erectus* (Chavira, et al, 1992).

Un factor de importancia, es que la porción media de la Bahía recibe una influencia considerable de afluentes provenientes de asentamientos humanos (Suárez, 1994). Además el escaso recambio del agua de la bahía promueve que sustancias ajenas al medio permanezcan por más tiempo y causen efectos negativos en la fauna y flora acuática.

La Ciudad de Chetumal y las áreas vecinas tienen deficiencias crónicas en el manejo de sus desechos, esto se debe a que la ciudad ha carecido de la planeación de un sistema eficiente de alcantarillado para canalizar sus aguas

residuales; contando únicamente con el uso de fosas sépticas con deficiencias técnicas que provocan la infiltración de las aguas de desecho al manto freático.

Otra práctica común es la conexión clandestina domiciliaria a la canalización que existe a través de la red pluvial que se distribuye a todo lo largo de la zona urbana y desemboca a las orillas de la bahía (Ortíz, *et al*, 1995), lo que se refleja en que se hayan encontrado muy altos niveles de contaminación fecal en las aguas de la bahía. Otros problemas de contaminación se derivan del aporte de derivados de combustibles y aceites y del uso de agroquímicos en la región del Río Hondo, principalmente para cultivo de caña de azúcar, además del posible incremento de las actividades recreativas con motores fuera de borda (Salazar-Vallejo *et al*, 1993).

Se destaca el hecho de que la Bahía de Chetumal fue declarada Santuario del Manatí (Gobierno del Estado de Quintana Roo, 1997).

Para este estudio se seleccionaron cinco sitios ubicados a lo largo del litoral occidental de la Bahía de Chetumal, en un gradiente de sur a norte partiendo de la Ciudad de Chetumal.

SITIO 1. Se ubicó en la ciudad de Chetumal, por las calles Boulevard Bahía y Cozumel, frente a una nevería. Presentó influencia directa de las descargas residuales y pluviales provenientes de la Ciudad de Chetumal, así como los aportes del Río Hondo, que atraviesa zonas con actividad agrícola. El sustrato inmediato es fangoso y de color grisáceo, con olor fétido, asociado a un alto contenido de materia orgánica en descomposición (Gonzalez-Escalante, 2001; Llanes-Baeza, 2002), alejado de la línea costera, se hallan grupos de rocas, donde se encuentran algas creciendo sobre ellas. El agua se ve sucia y de uno a cinco metros, es posible observar algunos desechos tales como botellas de vidrio, zapatos viejos, etc.

SITIO 2. Cercano al poblado de Calderas, comúnmente utilizado como sitio de recreo durante los fines de semana. Se forma un acantilado de aproximadamente metro y medio de alto, el sustrato es pedregoso. A diferencia del sitio 1, el agua se observa limpia y clara sin olores, sin embargo, debido a su

uso, en la parte de arriba del acantilado se observan botellas de vidrio y basuras varias.

SITIO 3. Ubicado en un punto alejado del poblado de Luis Echeverría frente a la antigua desaladora y con menor influencia antropogénica que el sitio 1. El sustrato es arenoso con una parte rocosa, con crecimiento de algas. El agua se ve limpia y clara, aunque no en la línea costera inmediata, mayor cantidad de mangle que en los sitios 1 y 2. A pesar de no encontrarse basura como en los dos sitios mencionados, se pudo observar enredadas en las algas que crecen sobre el mangle, basura como cordel y pedazos de plástico que no se observó en ningún otro sitio.

SITIO 4. Se encuentra aproximadamente a 28 Km NNE del Faro de Chetumal (Jiménez–Flores, 2000), por su ubicación recibe los aportes de la Laguna Guerrero, zona que también es considerada agrícola. El fondo es arenoso con piedras sobre las que crecen algas, el agua es clara y transparente, con poca profundidad. El sitio se halla alejado de influencia antropogénica.

SITIO 5. Aproximadamente a 35 Km NNE del Faro de Chetumal, (Jiménez–Flores, 2000). Al igual que el sitio 4 no recibe influencia antropogénica directa y el agua es clara, transparente y de poca profundidad. El sustrato es arenoso con agrupaciones de rocas a un metro de la línea de costa, las cuales se hallan cubiertas por una capa (0.5 cm) de sedimento.

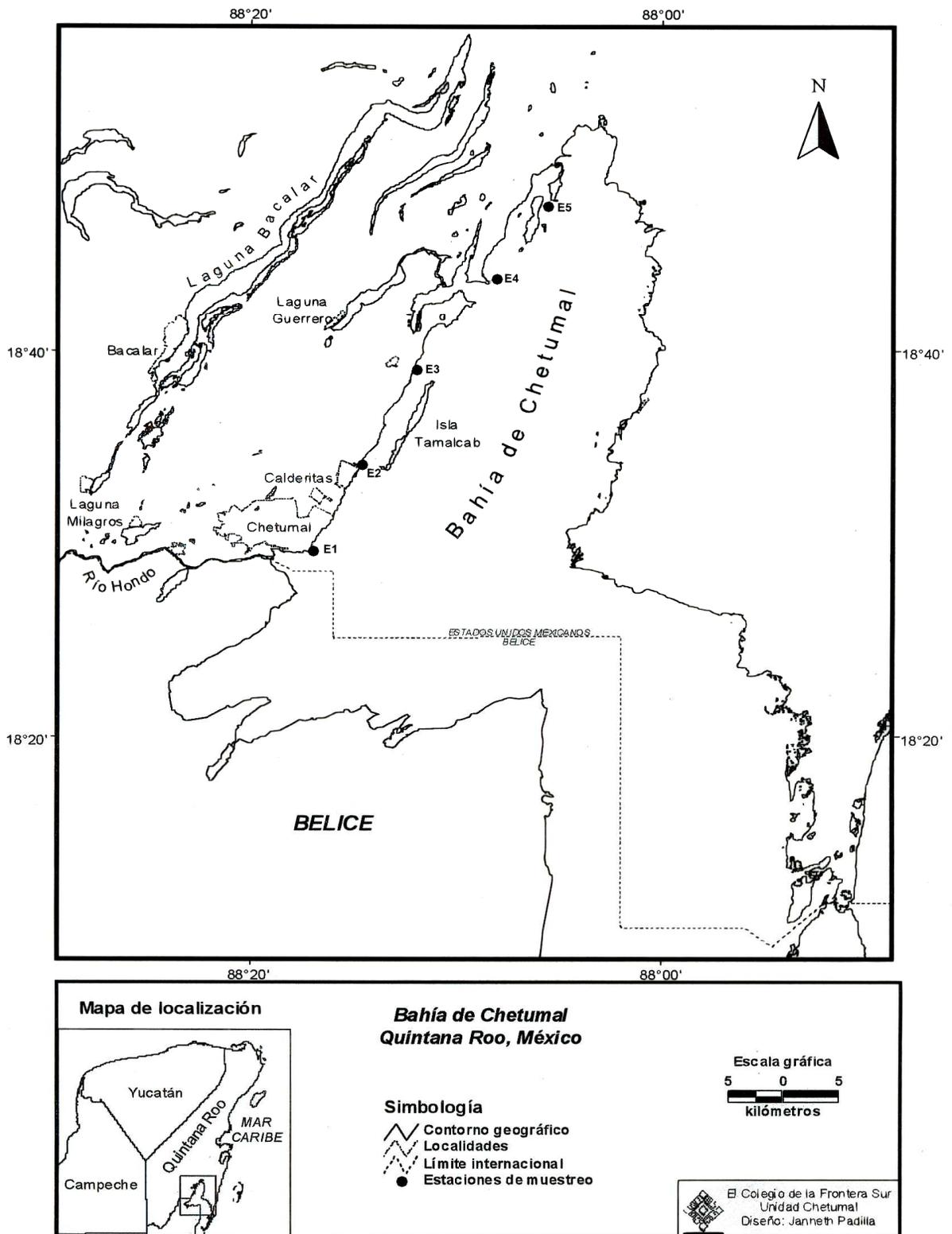


Figura 5.1. Área de estudio y ubicación de los sitios de muestreo.

6. METODOLOGÍA

6.1. CAMPO.

Para el estudio de variación espacial se seleccionaron los cinco puntos de muestreo dentro de la Bahía de Chetumal (Ver Figura 5.1), realizando muestreos en octubre de 1999 (temporada de lluvias) y en febrero de 2000 (temporada de secas). Para el estudio de la variación temporal se seleccionaron dos de los cinco puntos de muestreo (Sitios 1 y 3), realizando un muestreo en octubre de 1999 (temporada de lluvias) y tomando muestras mensuales de enero a mayo de 2000 (temporada de secas).

6.1.1. *Procedimiento de muestreo.*

Todo el material utilizado para la toma de muestras, fue lavado con detergente y enjuagado con agua corriente, dejándose remojar durante 24 horas en una solución de HNO₃ al 1%, enjuagándose al final de este tiempo con agua destilada y secada en estufa. Posteriormente todo el material seco se cubrió con plástico autoadherente hasta el momento de su uso, para evitar una posible contaminación.

En cada sitio de muestreo se tomaron muestras de agua, sedimento y algas.

Las muestras de agua fueron tomadas en recipientes de polietileno de 150 ml, a una profundidad no mayor de 50 cm de la superficie y no más de 100 m de la línea de costa, enjuagando dos veces el recipiente en el agua de la bahía antes de coleccionar la muestra, tomándose dos muestras de agua (muestra y réplica) en cada punto de muestreo.

Para la colecta de sedimento, se utilizaron bolsas transparentes de polietileno de 1 kg, coleccionando directamente en la bolsa aproximadamente 100 g de muestra de la capa superficial de 2 cm, para determinar contaminación reciente.

En el caso de las macroalgas *Batophora* spp. y *Bostrychia* spp, éstas se colectaron manualmente con guantes de látex aproximadamente 100 g de cada especie y se colocaron en bolsas de polietileno de 1/4 kg. Para la colecta de *Batophora* spp., debido a que crece en las oquedades de rocas calcáreas cubiertas de sedimento fino, fue necesario transportar rocas que se encontraban a una profundidad no mayor de 1 m a la orilla donde fueron lavadas en agua de la bahía y se procedió a colectar el alga en forma manual. En el caso de *Bostrychia* spp., que crece sobre la superficie de las raíces de mangle, se recolectó directamente de las raíces en forma manual, tomando la muestra húmeda, es decir que se tomo de la parte de la raíz que se encontrase por debajo del nivel del agua.

Todas las muestras fueron transportadas del campo al laboratorio, conservándolas a una temperatura de 4° C (APHA-AWWA-WPCF, 1992).

6.2. LABORATORIO

6.2.1. Procedimiento de preparación de la muestra.

Todo el material utilizado para el análisis de las muestras fue lavado de la misma forma en que se lavó el material utilizado para la toma de muestras, a excepción del material utilizado para el secado de las muestras de sedimento y algas, el cual fue lavado con detergente y agua corriente, enjuagado con HNO₃ al 5%, y lavado otra vez con agua destilada.

Las muestras de agua se analizaron mediante la técnica de determinación de metales en aguas naturales descrita en el manual Perkin-Elmer (1994), esto es, se filtró 75 ml de cada muestra, dividiéndolas en submuestras de 25 ml, con un filtro de 0.45 µm de membrana de nitrocelulosa en el momento de su llegada y refrigeradas para su lectura al día siguiente.

Las muestras de algas y sedimento fueron congeladas al momento de su llegada al laboratorio. Las muestras del alga *Batophora* spp. fueron descongeladas y

lavadas cuidadosamente con agua destilada para su secado en cápsulas de porcelana, en una estufa bacteriológica a 60°C, durante 36 horas.

En el caso de *Bostrychia spp.*, antes de ser secadas en las condiciones anteriormente mencionadas, las muestras fueron descongeladas, lavadas con agua destilada y examinadas con una lupa cuidadosamente sobre una placa de teflon para separarlas por medio de palillos de madera, de las otras especies de algas asociadas.

Las muestras de ambas algas, después del procedimiento descrito para cada una, fueron molidas en un mortero de porcelana, guardadas y etiquetadas en bolsas de polietileno de ¼ de kg.

Las muestras de sedimento fueron descongeladas y secadas por el proceso de secado descrito para las algas, siendo tamizadas posteriormente mediante una luz de malla de 710 mm de material plástico.

El análisis en el tejido de las macroalgas y sedimento, se realizó siguiendo la técnica para determinación de metales por digestión húmeda, descrita en el manual Perkin-Elmer (1994).

Se pesaron en papel 0.5 g de muestra seca, colocando cada muestra en un matraz semi-microkjeldahl de 100 ml y agregando 5 ml de HNO₃ concentrado grado espectrofotométrico, se le dejó hidrolizar durante una noche. Al cabo de este tiempo, las muestras fueron calentadas cuidadosamente en un microdigestor Kjeldahl de seis plazas marca Labconco, hasta cesar la producción de humo de NO₂. Las muestras se dejaron enfriar y se les agregó de 1 a 2ml de HClO₄ al 70%, después de ello se calentaron de nuevo permitiendo la evaporación de cada muestra hasta un volumen aproximado de 5 ml, posteriormente cada muestra fue transferida a matraces volumétricos de 25 ml y se diluyeron a un volumen de 25 ml con agua destilada.

6.2.2. Procedimiento de análisis de las muestras.

Como parte del control de calidad, las muestras de agua fueron analizadas por triplicado, con blancos de lectura por cada lote de 24 muestras, las muestras

de sedimento fueron analizadas por duplicado y en el caso de las algas por triplicado, con blancos de procedimiento por cada lote de 5 muestras.

Aunado a lo anterior se prepararon curvas de calibración para cada metal, el mismo día que se daba lectura a las muestras.

Se realizó la determinación de la concentración de los metales en agua, sedimento y las algas en un espectrofotómetro de absorción atómica Perkin Elmer modelo 3110, utilizando aire y gas acetileno para la flama.

Las condiciones de operación del equipo para los elementos de análisis se describen en la Tabla 6.2.1.

Tabla 6.2.1. Condiciones de operación del equipo de EAA.

| Elemento | Longitud de Onda (Nm) | Slit | Corrector Aa/Bg |
|----------|-----------------------|------|-----------------|
| Cd | 228.8 | 0.7 | Sí |
| Cu | 324.8 | 0.7 | No |
| Fe | 248.3 | 0.7 | Sí |
| Pb | 283.3 | 0.7 | No |
| Zn | 213.9 | 0.7 | Sí |

6.2.3. Preparación de las curvas de calibración

Para la preparación de las curvas de calibración se utilizaron soluciones stock (madre) con concentración de 1000 ppm para cada metal, a partir de las cuales se prepararon soluciones patrón para una concentración de 100 ppm, a partir de las cuales se realizaron las soluciones estándar para las curvas de calibración, éstas últimas se preparaban el mismo día de la lectura.

Para la curva de calibración de cada metal se utilizó un mínimo de cuatro concentraciones al momento de su lectura. Las concentraciones de las soluciones estándar dependieron de cada metal y el tipo de muestra (agua, sedimento o alga). Así, para el cadmio se utilizaron las siguientes concentraciones: 0.5, 0.8, 1.0, 1.5, 2.0 ($\mu\text{g/ml}$); para el cobre, 0.5, 1.0, 3.0, 5.0, 10.0, 15.0 ($\mu\text{g/ml}$); para el

hierro, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0, 10.0, 20.0 (µg/ml); para el plomo, 0.5, 2.0, 5.0, 8.0, 10.0 (µg/ml) y para el zinc de 0.3, 0.5, 0.6, 0.8, 1.0 (µg/ml).

6.2.4. Procedimiento de valoración del método utilizado.

Parte del control de calidad consistió en determinar el porcentaje de recuperación (Tabla 6.2.2.), procedimiento que consistió en tomar una muestra de sedimento cualquiera, de la cual se tomaron 4 alícuotas, a dos de ellas se les agregó una cantidad de solución patrón de cada metal analizado, para obtener una concentración conocida y a las dos restantes no se les agregó nada, a las cuatro se les sometió al proceso normal de digestión con un blanco de procedimiento, posteriormente se determinaron la concentración de metales en todas las muestras, y se calculó el porcentaje de recuperación, por medio de la siguiente fórmula:

$$\% R = (P \times 100) \div CC$$

Donde % R= porcentaje de recuperación de cada metal; P = concentración obtenida de la diferencia entre la concentración promedio de las muestras con solución patrón y la concentración promedio de las muestras utilizadas como blancos; CC = concentración que deberían tener las muestras, con base en la cantidad agregada de solución patrón de cada metal.

Tabla 6.2.2. Porcentaje de recuperación de los metales en sedimento (las concentraciones están dadas en ppm peso seco).

| Metal | Valor conocido (ppm) | Valor obtenido (ppm) | % Recuperación |
|-------|----------------------|----------------------|----------------|
| Cd | 2.00 | 1.20 | 59.75 |
| Cu | 2.00 | 1.19 | 59.50 |
| Fe | 15.00 | 25.06 | 167.03 |
| Pb | 2.00 | 1.62 | 80.75 |
| Zn | 10.00 | 6.55 | 65.45 |

6.3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.

6.3.1. *Cálculo del Factor de Bioconcentración.*

Para el cálculo del factor de concentración se utilizó la siguiente fórmula:

$$f_c = C_{O_{Ag}} \div C_{Ag}$$

Donde f_c = Factor de bioconcentración; $C_{O_{Ag}}$ = Concentración del contaminante en el organismo acuático C_{Ag} = Concentración del contaminante en agua/sedimento (Vega y Reynaga, 1990).

6.3.2. *Análisis estadístico*

Para la realización del análisis estadístico de resultados, se utilizaron los programas Microsoft Excel y STATISTICA para Windows.

Los resultados obtenidos de la determinación de metales, fueron evaluados para conocer si presentaban una distribución normal (Kolgomogorov-Smmirnov) y homogeneidad de varianzas (Levene's Test), sin embargo este análisis mostró que los valores obtenidos de las lecturas de los metales, no presentaban homogeneidad ni una distribución normal de datos, por lo que se utilizó el análisis no paramétrico Kruskan-Wallis para conocer si existían diferencias significativas entre sitios o meses, así como la tendencia general de las concentraciones (cálculo de la mediana)

Para la obtención de las medias se utilizó dentro del programa de STATISTICA, la opción de Análisis de Varianza (ANOVA) de una vía, y para la elaboración de las gráficas se utilizó mismo análisis pero en dos vías.

7. RESULTADOS.

7.1. VARIACIÓN TEMPORAL

7.1.1. AGUA.

En todos los meses la tendencia general de las concentraciones promedio de los metales pesados en los dos sitios analizados, fue: Pb>Fe=Cd>Zn (0.06, 0.02 y 0.01 µg/ml, respectivamente). Tabla 7.1.1.

Cadmio.

La concentración promedio más alta, 0.04 µg/ml, se registró en el mes de mayo en los sitios 1 y 3. No se detectó cadmio para el mes de enero en ninguno de los sitios, siendo en febrero y marzo donde se detectaron las más bajas concentraciones, 0.01 µg/ml, para ambos sitios. (Tabla 7.1.1.)

Gráficamente, se puede observar que el comportamiento de las concentraciones de cadmio en los dos sitios para todos los meses fue similar, con la excepción de marzo.

Es posible diferenciar un patrón temporal en el contenido de cadmio en agua, observándose un gradiente ascendente en las concentraciones que va de enero a mayo, para ambos sitios. (Figura 7.1.1.)

El análisis estadístico Kruskal-Wallis, mostró que había diferencias significativas ($p<0.05$), entre los meses, las cuales son observables gráficamente para el sitio 1 en octubre y mayo, con el resto de los meses y para el sitio 3, en mayo con el resto de los meses. (Figura 7.1.1.)

Cobre.

A excepción de febrero para el sitio 1, no se detectó cobre en agua, la concentración promedio del mes registrada fue de 0.01 µg/ml (Tabla 7.1.1.)

Fierro.

La concentración promedio más alta de fierro se registró en octubre en el sitio 1 y en abril y mayo, para el sitio 3, 0.04 µg/ml.

El valor más bajo de fierro se encontró en el mes de enero para el sitio 1 y en de marzo para el sitio 3 (0.01 µg/ml, valor promedio), para ambos sitios.

No se detectó fierro para de marzo en el sitio 1, ni en de enero y febrero para el sitio 3 (Tabla 7.1.1.)

De la gráfica es posible observar un comportamiento similar en las concentraciones de fierro para ambos sitios, con la excepción de febrero, es decir las concentraciones descienden de octubre a enero y ascienden a partir de marzo, no variando de abril a mayo (Figura 7.1.1.).

El análisis estadístico mostró que existían diferencias significativas ($p < 0.05$) entre meses, observándose gráficamente estas diferencias entre enero y marzo para el sitio 1 y entre enero a marzo para el sitio 3 con el resto de los meses (Figura 7.1.1.).

Plomo.

La concentración promedio más alta de plomo se encontró en octubre para el sitio 1 (0.20 µg/ml). Las concentraciones más bajas se registraron para febrero para ambos sitios, y para marzo en el sitio 1 (0.03 µg/ml). No se detectó plomo en enero para el sitio 1. (Tabla 7.1.1.)

Gráficamente para ambos sitios se puede observar un patrón descendente que va de octubre a mayo (Figura 7.1.1.). El análisis estadístico reveló que no que existían diferencias significativas ($p > 0.05$) entre meses.

Zinc.

Para el zinc, en general, se registró el mismo valor para ambos sitios, 0.01 µg/ml en todos los meses, a excepción de enero para ambos sitios y en mayo para el sitio 1, donde no se detectó zinc (Tabla 7.1.1.)

Dados los resultados, gráficamente es posible observar que las concentraciones detectadas se mantuvieron casi sin variación en todos los meses para ambos sitios, a excepción de los meses de febrero y mayo (Figura 7.1.1.).

El análisis estadístico mostró que existían diferencias significativas ($p < 0.05$) entre meses, observándose estas diferencias para ambos sitios, en enero y mayo con los demás meses (Figura 7.1.1.)

Se puede observar de manera general, que para cada uno de los cinco metales, los dos sitios presentaron comportamientos temporales paralelos (Figura 7.1.1.). Así mismo, se observa que para el Cd, Fe y Pb, hay una marcada disminución de las concentraciones de los metales hacia la temporada de secas que, con la excepción del Pb, se incrementa al final de ésta, a pesar de lo anterior solamente el Cd y el Pb presentaron diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$) El Cu y el Zn, presentaron poca variación con la excepción de uno o dos meses, manteniéndose estables independientemente de la temporada de lluvias o secas.

Tabla 7.1.1. Valores promedio de las concentraciones de metales pesados en agua en dos sitios de la Bahía de Chetumal. Las concentraciones están dadas en µg/ml.

| MES | SITIO 1 | | | | | SITIO 3 | | | | |
|-----|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------|----------------|----------------|----------------|
| | Cd | Cu | Fe | Pb | Zn | Cd | Cu | Fe | Pb | Zn |
| OCT | 0.01 ±0.000 | N. D. | 0.04 ±0.000 | 0.20 ±0.000 | 0.01 ±0.000 | 0.04 ±0.000 | N. D. | 0.02 ±0.000 | 0.18 ±0.020 | 0.01 ±0.000 |
| ENE | N. D. | N. D. | 0.01 ±0.000 | 0.17 ±0.000 | N. D. | N. D. | N. D. | N. D. | N. D. | N. D. |
| FEB | 0.01 ±0.007 | 0.01 ±0.000 | 0.03 ±0.007 | 0.03 ±0.007 | 0.01 ±0.007 | 0.01 ±0.007 | N. D. | N. D. | 0.03 ±0.007 | 0.01 ±0.000 |
| MAR | 0.01 ±0.014 | N. D. | N. D. | 0.03 ±0.014 | 0.01 ±0.000 | 0.01 ±0.007 | N. D. | 0.01 ±0.007 | 0.05 ±0.014 | 0.01 ±0.000 |
| ABR | 0.02 ±0.007 | N. D. | 0.02 ±0.000 | 0.06 ±0.021 | 0.01 ±0.000 | 0.02 ±0.000 | N. D. | 0.04 ±0.014 | 0.06 ±0.035 | 0.01 ±0.000 |
| MAY | 0.04 ±0.000 | N. D. | 0.02 ±0.000 | 0.06 ±0.021 | N. D. | 0.04 ±0.000 | N. D. | 0.04 ±0.014 | 0.06 ±0.035 | 0.01 ±0.007 |

N. D. No detectado.

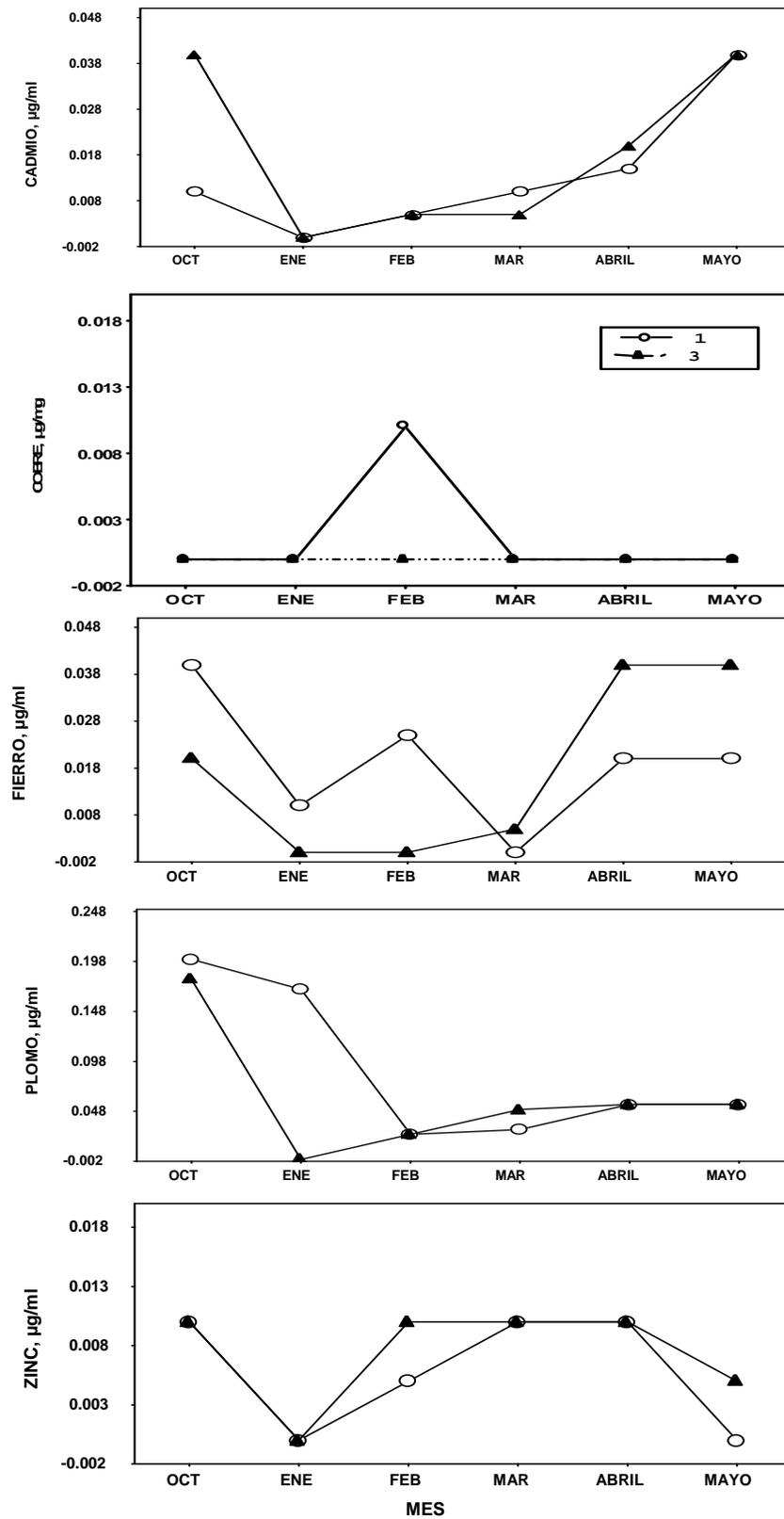


Fig. 7.1.1. Niveles de metales pesados en agua, en dos sitios de la Bahía de Chetumal, México. En el período de octubre de 1999 a mayo de 2000.

7.1.2. SEDIMENTO.

En los seis meses de estudio, la tendencia general de las concentraciones promedio de los metales pesados en sedimento en los dos sitios analizados, fue: Fe>Zn>Pb>Cd>Cu, 549.72, 5.84, 1.94, 1.37, y 1.31 µg/g, respectivamente (Tabla 7.1.2.).

Cadmio.

Las concentraciones promedio de cadmio más altas: 5.16 y 4.66 µg/g, se registraron en el mes de enero en los sitios 1 y 3, respectivamente. La más baja concentración se registró en abril en el sitio 3 (0.25 µg/g). No se detectó cadmio para el mes de febrero en el sitio 3 (Tabla 7.1.2.)

Gráficamente, es posible observar para ambos sitios, un gradiente temporal descendente de enero a mayo (Figura 7.1.2.), sin embargo no se encontraron diferencias estadísticas significativas ($p>0.05$), entre los meses.

Cobre.

Las concentraciones promedio más altas de cobre se registraron en enero para los sitios 1 y 3, 3.66 y 5.49 µg/g, respectivamente. La concentración más baja se detectó en abril para el sitio 1. No se detectó cobre en sedimento los meses de abril y mayo en el sitio 3 (Tabla 7.1.2.)

De la gráfica se puede observar un comportamiento similar para ambos sitios, a excepción de febrero y mayo, por lo que es posible observar un gradiente descendente para ambos sitios a partir de enero hasta abril, para el sitio 1 y hasta mayo para el sitio 3 (Figura 7.1.2.). Sin embargo no se encontraron diferencias significativas entre las concentraciones de cobre entre meses ($p>0.05$).

Fierro.

Para el fierro, las concentraciones promedio más alta y más baja se registraron en el sitio 1 los meses de mayo con 1017.62 µg/g, y octubre con 227.32 µg/g, respectivamente. (Tabla 7.1.2.)

Es posible observar un comportamiento diferente para cada sitio en las concentraciones de fierro en sedimento. Para el sitio 1, en general, se observa un patrón ascendente en las concentraciones, por el contrario, para el sitio 3 es posible observar que este patrón es descendente (Figura 7.1.2.). No obstante lo anterior, no se encontraron diferencias estadísticas significativas de las concentraciones de fierro entre meses ($p > 0.05$).

Plomo.

Para el plomo, la concentración promedio más alta se encontró en octubre para el sitio 1 (12.31 µg/g). La concentración más baja se registró para mayo, en el sitio 3 (0.25 µg/g). No se detectó plomo en el mes de marzo en el sitio 3 (Tabla 7.1.2.)

Es posible observar un comportamiento similar para ambos sitios, es decir un patrón de baja concentración a lo largo del período de estudio, con excepción de octubre en el sitio 1 (Figura 7.1.2.).

El análisis estadístico reveló que existían diferencias significativas ($p < 0.05$), entre los meses, las cuales son observables gráficamente, principalmente para el sitio 1, entre octubre con los demás meses (Figura 7.1.2)

Zinc.

La concentración promedio más alta de zinc se registró en octubre para el sitio 1 con 16.31 µg/g y la concentración más baja se detectó en mayo para el sitio 3 (0.50 µg/g) (Tabla 7.1.2.)

Es posible observar un comportamiento diferente de las concentraciones para cada sitio. Se puede observar que, para el sitio 1 se presenta un gradiente temporal descendente de octubre a abril, en tanto que para el sitio 3 las concentraciones se mantienen bajas con excepción de enero y abril (Figura 7.1.2). Aunque no se encontraron diferencias estadísticas significativas ($p>0.05$) entre meses.

De manera general, es posible observar para el Cd, Cu y Pb, un comportamiento paralelo de ambos sitios, con respecto a las concentraciones encontradas. Para el Cd, Cu, Fe, y Zn, en el sitio 3, es posible observar una tendencia a la disminución de las concentraciones a partir del inicio de la temporada de secas, ya que en este punto alcanza las máximas, superando incluso las detectadas en la temporada de lluvias. Este mismo comportamiento se observa para el sitio 1, pero sólo para el Cd y Cu.

A pesar de lo anterior el análisis estadístico mostró que únicamente el Pb, presentó diferencias estadísticas significativas ($p>0.05$) entre meses.

Tabla 7.1.2. Valores promedio de las concentraciones de metales pesados en sedimento en dos sitios de la Bahía de Chetumal. Las concentraciones están dadas en µg/g peso seco.

| MES | SITIO 1 | | | | | SITIO 3 | | | | |
|-----|----------------|----------------|---------------------|-----------------|------------------|----------------|----------------|--------------------|----------------|-----------------|
| | Cd | Cu | Fe | Pb | Zn | Cd | Cu | Fe | Pb | Zn |
| OCT | 3.50 ±0.495 | 2.17 ±1.155 | 477.14 ±62.602 | 12.31 ±6.496 | 16.31 ±10.142 | 1.67 ±0.289 | 1.67 ±0.289 | 227.32 ±51.996 | 3.00 ±2.784 | 1.00 ±0.000 |
| ENE | 5.16 ±0.577 | 3.66 ±1.438 | 634.48 ±43.795 | 1.17 ±1.258 | 13.54 ±5.686 | 4.66 ±0.286 | 5.49 ±2.176 | 643.05 ±117.760 | 2.16 ±2.249 | 10.32 ±4.006 |
| FEB | 2.37 ±2.804 | 3.00 ±0.705 | 829.75 ±660.630 | 3.37 ±1.927 | 5.75 ±4.969 | N. D. | 0.13 ±0.250 | 317.11 ±34.876 | 2.13 ±0.854 | 1.00 ±0.707 |
| MAR | 0.75 ±0.866 | 1.00 ±0.408 | 787.60 ±85.256 | 1.13 ±1.631 | 7.62 ±1.794 | 0.38 ±0.750 | 0.13 ±0.257 | 248.02 ±45.715 | N. D. | 1.25 ±1.190 |
| ABR | 0.75 ±0.500 | 0.63 ±0.479 | 645.73 ±327.790 | 0.38 ±0.479 | 5.75 ±3.199 | 0.25 ±0.500 | N. D. | 307.03 ±81.659 | 1.13 ±0.854 | 6.12 ±6.558 |
| MAY | 0.75 ±0.457 | 1.75 ±1.190 | 1017.62 ±209.320 | 1.75 ±1.190 | 9.87 ±1.111 | 1.00 ±1.155 | N. D. | 353.39 ±31.711 | 0.25 ±0.500 | 0.50 ±0.577 |

N. D. No detectado.

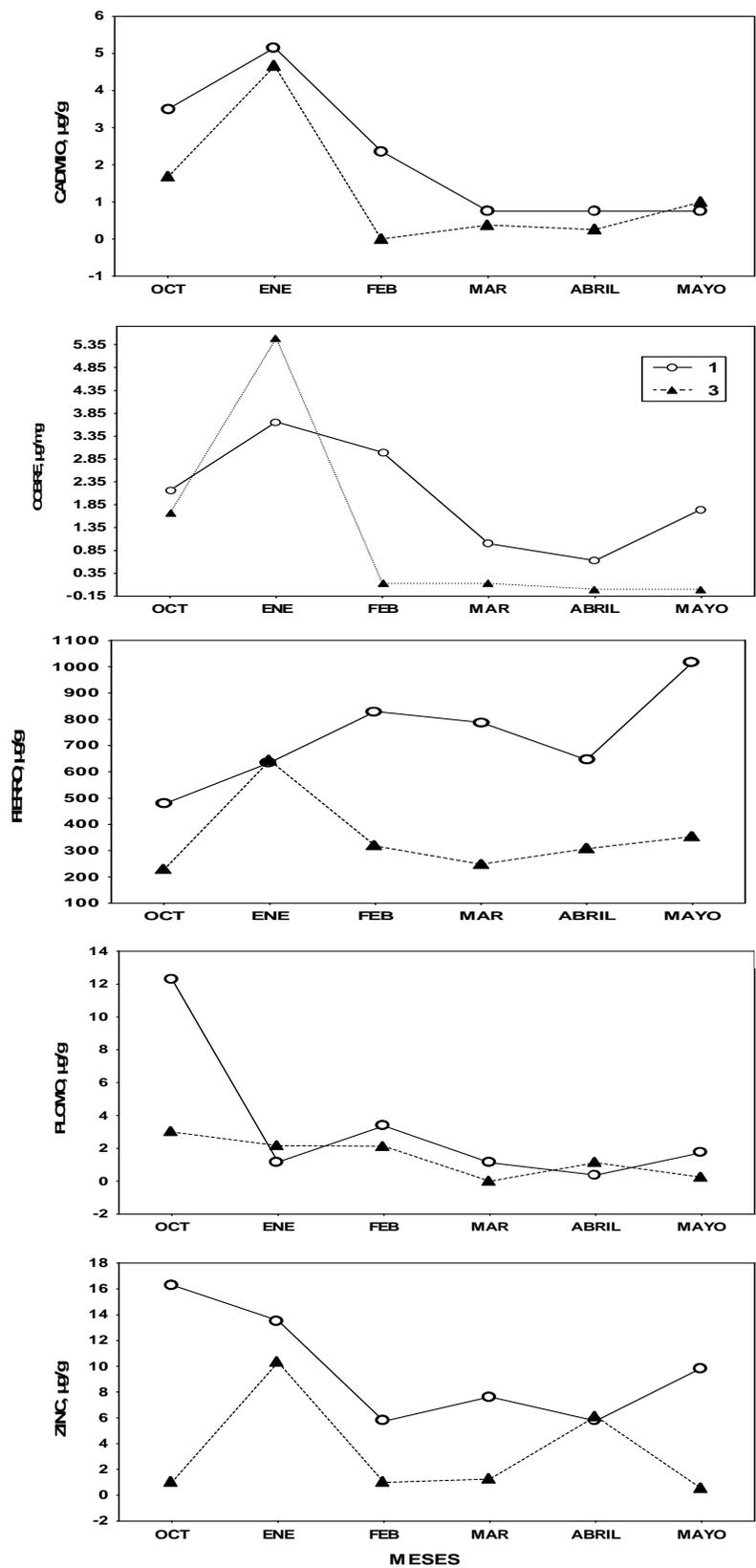


Fig. 7.1.2. Niveles de metales pesados en sedimento, en dos sitios de la Bahía de Chetumal, México. En el período de octubre de 1999 a mayo de 2000.

7.1.3. *Batophora* spp.

En los seis meses de estudio, la tendencia general de las concentraciones promedio de los metales pesados en *Batophora* spp. en los dos sitios analizados, fue: Fe>Zn>Pb>Cd>Cu, 1013.28, 3.62, 3.56, 1.84, y 1.83 µg/g, respectivamente (Tabla 7.1.3.).

Cadmio.

Para el cadmio, las concentraciones promedio más altas, 4.50 y 6.33 µg/g, se registraron para el sitio 3 en los meses de abril y mayo, respectivamente. La más baja concentración, 0.17 µg/g, se registró en el sitio 3, en enero. No se detectó cadmio para octubre en el sitio 1 (Tabla 7.1.3.)

Es posible observar un gradiente temporal ascendente para el sitio 1, que va de octubre a abril, para el sitio 3, se observa también un gradiente ascendente, pero que va de enero a mayo (Figura 7.1.3)

El análisis estadístico reveló que existían diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los meses, diferencias que son visibles gráficamente principalmente para el sitio 3, en mayo (Figura 7.1.3.).

Cobre.

Las concentraciones promedio más altas de cobre se registraron para el sitio 1 en enero y febrero, 2.50 y 2.67 µg/g, respectivamente, la concentración más baja, 1.00 µg/g, se registró en abril para el sitio 3. (Tabla 7.1.3.)

Es posible observar de manera general, un comportamiento de las concentraciones de cobre similar para cada sitio, ya que las concentraciones se mantuvieron sin variaciones significativas (Figura 7.1.3).

No se encontraron diferencias significativas ($p > 0.05$) entre los meses.

Fierro.

La concentración promedio de fierro más alta se registró en mayo para el sitio 1 con 2,350.10 $\mu\text{g/g}$ y el valor más bajo se detectó en octubre para el sitio 3 con 444.39 $\mu\text{g/g}$ (Tabla 7.1.3.)

De la gráfica es posible observar un comportamiento en las concentraciones de fierro en *Batophora* spp. diferente para cada sitio; para el sitio 1 se observa un gradiente temporal ascendente de octubre a mayo, con la excepción de febrero (Figura 7.1.3), mientras que el sitio 3 las concentraciones casi no presentaron variaciones a lo largo del período de muestreo.

El análisis estadístico reveló que existían diferencias significativas de las concentraciones de fierro entre meses ($p < 0.05$), diferencias que se pueden observar gráficamente en el sitio 1 (Figura 7.1.3.).

Plomo.

La concentración promedio de plomo más alta se encontró en mayo para el sitio 1 con 11.75 $\mu\text{g/g}$. La concentración más baja se registró para enero en ambos sitios con 0.67 $\mu\text{g/g}$. No se detectó plomo en febrero en el sitio 1, ni en abril para el sitio 3 (Tabla 7.1.3.)

Es posible observar un comportamiento similar solamente de octubre a marzo mientras que para abril y mayo las concentraciones aumentaron en el sitio 1, disminuyendo en el sitio 3 (Figura 7.1.3.).

El análisis estadístico arrojó diferencias significativas entre las concentraciones de plomo entre meses, ($p < 0.05$), estas diferencias se pueden observar gráficamente, principalmente en el mes de mayo del sitio 1, con el resto de los meses para ambos sitios (Figura 7.1.3.)

Zinc.

Para el zinc, la concentración promedio más alta se registró en mayo en el sitio 3 con 11.49 µg/g, la concentración más baja se detectó en abril para el sitio 1 con 0.67 µg/g, no se detectó zinc para este sitio en marzo (Tabla 7.1.3.)

Es posible observar un comportamiento similar para ambos sitios, observándose un gradiente ascendente que va del mes de marzo al mes de mayo. (Figura 7.1.3.)

No se encontraron diferencias significativas entre las concentraciones de zinc entre meses ($p > 0.05$).

En general se puede observar que las concentraciones de Cd, Cu, Fe, Pb y Zn en los dos sitios tuvieron un comportamiento similar, sin embargo, se observó una tendencia más marcada para el Fe y Pb, en el sitio 1 y para el Cd, y Zn en el sitio 3 hacia la temporada de secas. Esta misma tendencia se observa para el Cd en el sitio 1, y para el Fe, en el sitio 3, pero de manera menos visible

Tabla 7.1.3. Valores promedio de las concentraciones de metales pesados en *Batophora* spp. en dos sitios de la Bahía de Chetumal. Las concentraciones están dadas en µg/g peso seco.

| MES | SITIO 1 | | | | | SITIO 3 | | | | |
|-----|----------------|----------------|---------------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|-------------------|----------------|-----------------|
| | Cd | Cu | Fe | Pb | Zn | Cd | Cu | Fe | Pb | Zn |
| OCT | N. D. | 2.17 ±0.578 | 677.66 ±37.292 | 4.49 ±2.592 | 5.99 ±1.803 | 0.33 ±0.288 | 1.50 ±0.001 | 444.39 ±52.646 | 3.00 ±0.707 | 2.50 ±0.864 |
| ENE | 0.67 ±0.288 | 2.50 ±0.001 | 949.79 ±60.539 | 0.67 ±1.154 | 4.33 ±0.764 | 0.17 ±0.289 | 1.33 ±0.578 | 490.61 ±33.176 | 0.67 ±1.154 | 2.00 ±1.731 |
| FEB | 1.17 ±0.288 | 2.67 ±0.288 | 918.53 ±429.732 | N. D. | 6.00 ±0.704 | 1.17 ±0.289 | 1.33 ±0.288 | 805.61 ±24.252 | 3.33 ±3.819 | 3.50 ±0.866 |
| MAR | 1.50 ±0.000 | 2.00 ±0.001 | 1493.97 ±64.462 | 6.66 ±3.050 | N. D. | 1.83 ±0.289 | 1.50 ±0.001 | 773.91 ±47.401 | 4.66 ±1.526 | 1.67 ±2.884 |
| ABR | 2.67 ±1.153 | 2.00 ±0.001 | 1516.42 ±127.023 | 6.33 ±3.506 | 0.67 ±1.154 | 4.50 ±0.709 | 1.00 ±0.000 | 916.82 ±9.639 | N. D. | 6.00 ±1.413 |
| MAY | 2.67 ±0.577 | 2.33 ±0.577 | 2350.10 ±115.265 | 11.75 ±0.353 | 2.27 ±1.365 | 6.33 ±0.577 | 1.33 ±2.309 | 789.36 ±55.317 | 1.33 ±2.309 | 11.49 ±3.536 |

N. D. No detectado.

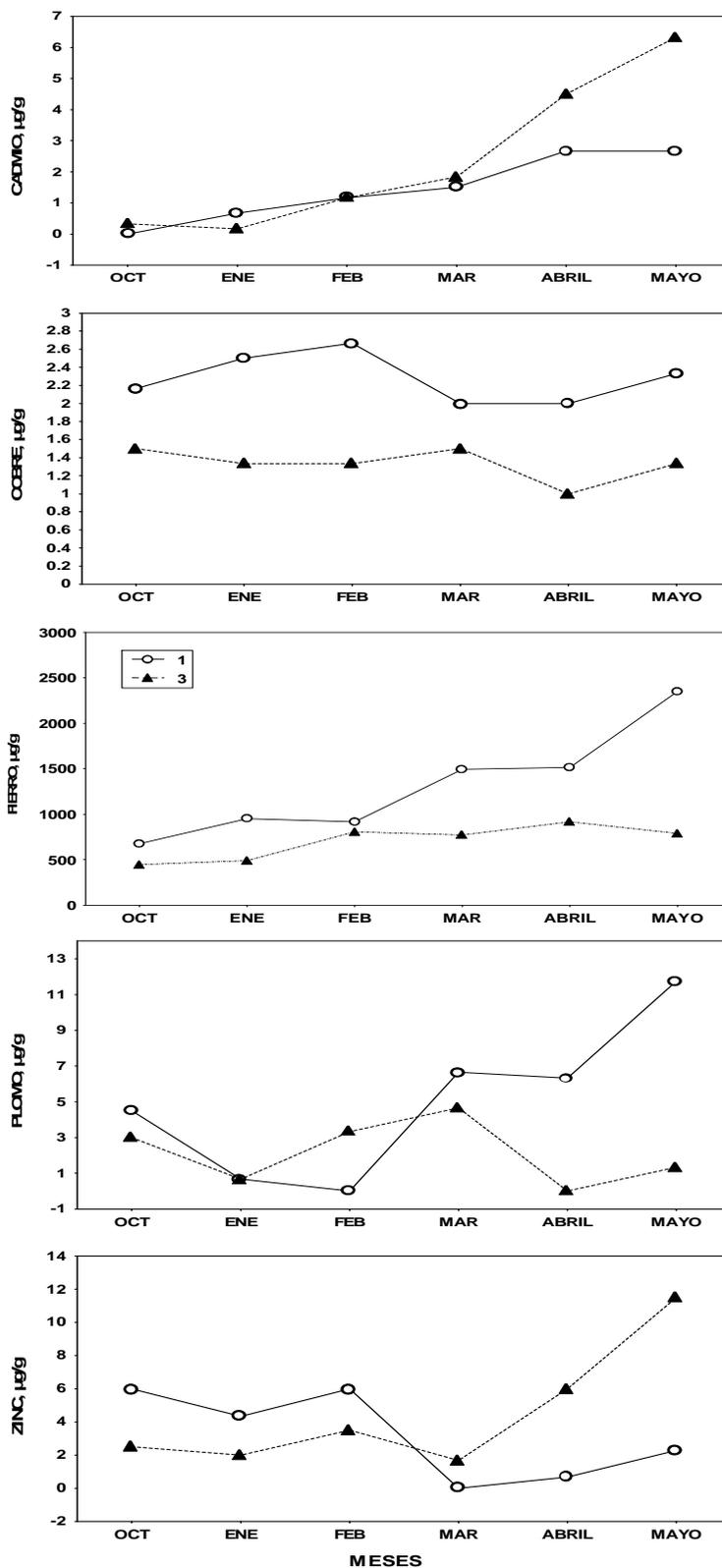


Fig. 7.1.3. Niveles de metales pesados en *Batophora sp.*, en dos sitios de la Bahía de Chetumal, México. En el período de octubre de 1999 a mayo de 2000.

7.1.4. *Bostrychia* spp.

En los seis meses de estudio la tendencia general de las concentraciones promedio de los metales pesados en *Bostrychia* spp. en los dos sitios analizados, fue: Fe>Zn>Cd>Cu, 558.11, 3.26, 2.04, 1.21 µg/g, respectivamente (tabla 7.1.4.)

Cadmio.

Las concentraciones promedio de cadmio más altas, 3.83 y 4.17 µg/g, se registraron en febrero para los sitios 1 y 3 respectivamente, la concentración más baja se detectó en el sitio 3 para abril con 0.17 µg/g (Tabla 7.1.4.)

Es posible distinguir un comportamiento similar en las concentraciones de cadmio en tejidos para ambos sitios, observándose dos gradientes temporales, el primero ascendente, que va de octubre a febrero y el segundo descendente que va de febrero a mayo (Figura 7.1.4.)

Se encontraron diferencias significativas entre meses ($p < 0.05$), estas diferencias radican principalmente en febrero para ambos sitios con el resto de los meses. (Figura 7.1.4.)

Cobre.

La concentración promedio más alta y más baja de cobre se registraron en el sitio 1 en mayo con 2.50 µg/g y en marzo con 0.17 µg/g (Tabla 7.1.4.).

De la gráfica se puede observar un comportamiento similar para ambos sitios hasta abril (Figura 7.1.4.).

El análisis estadístico arrojó diferencias significativas entre meses ($p < 0.05$), siendo más visibles éstas para el sitio, en mayo con el resto de los meses (Figura 7.1.4.).

Fierro.

Para el fierro, la concentración promedio más alta se registró en octubre en el sitio 1 con 1,042.80 µg/g y el valor más bajo se detectó en mayo para el sitio 3 con 164.58 µg/g (Tabla 7.1.4.)

Es posible observar un comportamiento en las concentraciones de fierro diferente para cada sitio; es posible observar para el sitio 3 un gradiente descendente que va de febrero a mayo, mientras que para el sitio 1 se observa un gradiente ascendente que va de enero a marzo (Figura 7.1.4.), sin embargo, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre meses ($p > 0.05$).

Plomo.

Para el plomo, sólo se registró una concentración promedio del mes de 0.02 µg/g para el sitio 1, en octubre (Tabla 7.1.4.)

Zinc.

Para el zinc, la concentración promedio más alta se registró en marzo para el sitio 1, y para febrero en el sitio 3 con 5.16 µg/g. La concentración más baja se detectó en enero para el sitio 1 con 0.17 µg/g. (Tabla 7.1.4.)

De la gráfica es posible observar un comportamiento opuesto en los meses de enero, febrero y marzo en los dos sitios, coincidiendo en octubre, abril y mayo (Figura 7.1.4.).

No se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre las concentraciones de zinc entre meses ($p > 0.05$).

En general, únicamente el Cd, Cu y Pb (y estos dos últimos con la excepción de octubre y mayo), coincidieron en su comportamiento temporal de sus concentraciones en ambos sitios. Se pudo observar para el Cd y Fe un patrón descendente en el sitio 3 que va de febrero a mayo (este mismo patrón se observó

en el sitio 1 para el Cd), en el resto de los casos, las concentraciones variaron dependiendo del metal y del sitio, sin un patrón definido.

Tabla 7.1.4. Valores promedio de las concentraciones de metales pesados en *Bostrychia* spp. en dos sitios de la Bahía de Chetumal. Las concentraciones están dadas en µg/g peso seco.

| MES | SITIO 1 | | | | | SITIO 3 | | | | |
|------|----------------|----------------|--------------------|-------|----------------|----------------|----------------|-------------------|----------------|----------------|
| | Cd | Cu | Fe | Pb | Zn | Cd | Cu | Fe | Pb | Zn |
| OCT | 2.33 ±0.289 | 1.67 ±0.289 | 1041.80 ±66.445 | N. D. | 1.67 ±0.289 | 2.67 ±0.288 | 1.33 ±0.289 | 436.76 ±86.042 | 0.02 ±0.029 | 2.00 ±0.001 |
| ENE | 3.33 ±0.577 | 0.83 ±0.289 | 166.75 ±43.069 | N. D. | 4.50 ±0.866 | 3.33 ±0.288 | 0.83 ±0.289 | 399.43 ±81.232 | N. D. | 0.17 ±0.289 |
| FEB | 3.83 ±0.289 | 1.00 ±0.500 | 720.71 ±43.197 | N. D. | 1.17 ±0.288 | 4.17 ±0.289 | 1.67 ±0.289 | 663.41 ±65.513 | N. D. | 5.16 ±1.153 |
| MAR | 1.83 ±0.289 | 0.17 ±0.289 | 836.99 ±242.425 | N. D. | 5.16 ±0.288 | 1.17 ±0.289 | 0.67 ±0.289 | 403.45 ±32.154 | N. D. | 1.17 ±0.763 |
| ABR | 1.00 ±0.999 | 0.67 ±0.763 | 701.58 ±196.988 | N. D. | 4.50 ±1.000 | 0.17 ±0.289 | 1.83 ±0.289 | 288.48 ±61.138 | N. D. | 4.50 ±0.501 |
| MAYO | 0.33 ±0.289 | 2.50 ±0.500 | 872.34 ±109.504 | N. D. | 5.00 ±0.501 | 0.33 ±0.577 | 1.33 ±0.289 | 164.58 ±20.059 | N. D. | 4.16 ±0.290 |

N. D. No detectado.

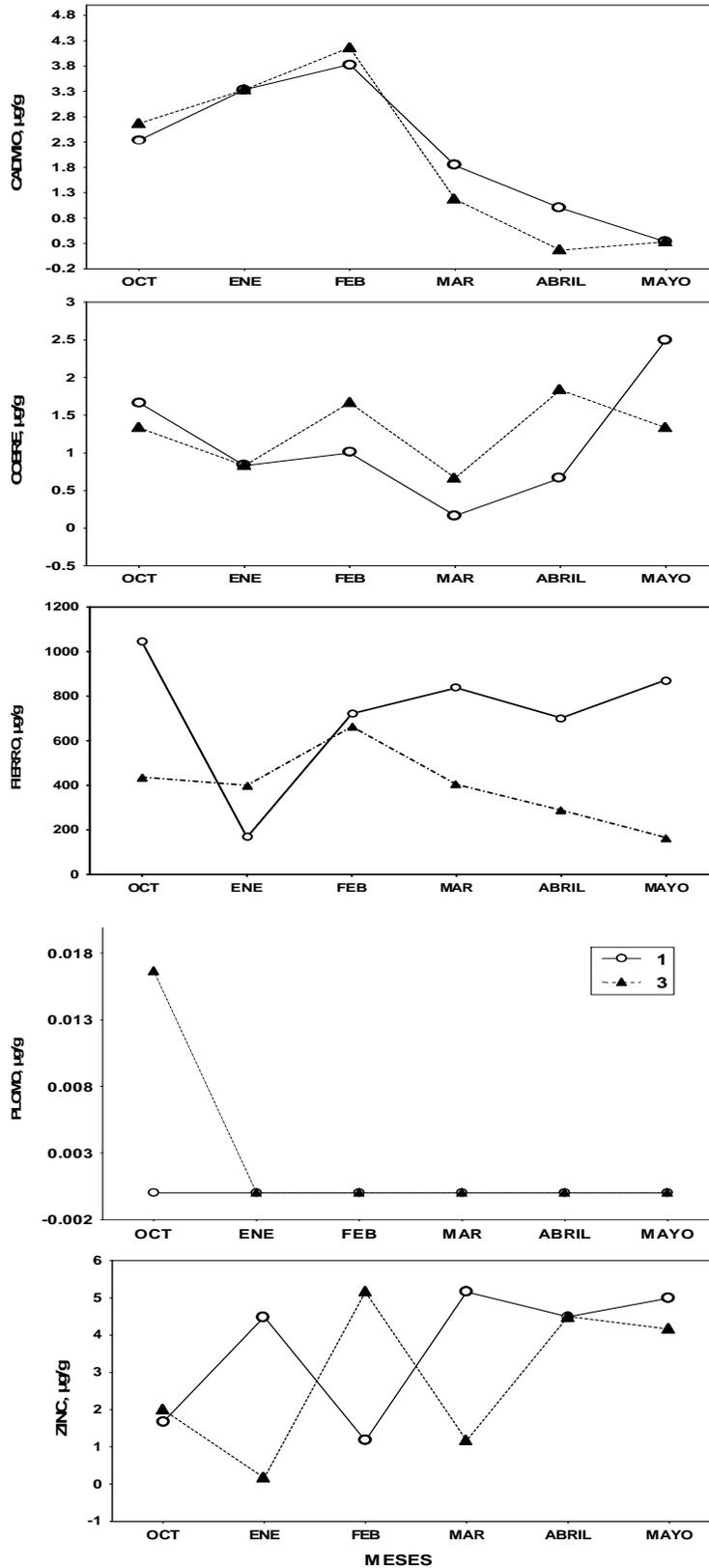


Fig. 7.1.4. Niveles de metales pesados en *Bostrychia* spp., en dos sitios de la Bahía de Chetumal, México. En el período de octubre de 1999 a mayo de 2000.

En general, se pudo observar que el Cd, presentó similitud en el comportamiento temporal en ambos sitios para cada compartimiento analizado (agua, sedimento y las dos especies de algas),

Un factor que se observó en el mes de enero, para ambos sitios, es que no se detectó Cd en el agua, mientras que para el sedimento en ese mes, en ambos sitios, se registraron los valores más altos, de manera similar ocurrió con las dos especies de algas, ya que para *Batophora* spp., en mayo, en ambos sitios, se registraron los valores más altos, mientras que para *Bostrychia* spp. en ese mes y para el sitio 1 se registró el valor más bajo (para el sitio 3, se registró ese mismo valor, 0.33 µg/g, pero el valor más bajo, 0.17µg/g, correspondió a abril). Otro factor que resalta es el comportamiento que tuvieron entre los elementos, ya que se observó un gradiente temporal similar para el agua y *Batophora* spp., es decir se observó una tendencia ascendente, aunque para el agua empieza a partir del inicio de la temporada de secas (enero) y para *Batophora* spp., a partir de la temporada de lluvias (octubre), asimismo se observó un gradiente temporal descendente hacia la temporada de secas para el sedimento y *Bostrychia* spp., para el sedimento éste inicia a partir del inicio de la temporada de secas y para *Bostrychia* spp. a partir de febrero.

El Cu presentó similitud temporal en ambos sitios para cada uno de los elementos analizados, aunque no tan marcada como el Cd. Para el sedimento mostró una tendencia de disminución hacia la temporada de secas a partir del inicio de esta, no se pudo observar un patrón definido para el resto de los elementos.

El Fe sólo presentó similitud entre sus concentraciones de los dos sitios para el agua y *Batophora* spp., ya que para el sedimento y *Bostrychia* spp. presentan tendencias contrarias entre sitios. Resalta el hecho de que para el sitio 1 se observa una tendencia ascendente hacia la temporada de secas para el sedimento, *Batophora* spp. y *Bostrychia* spp. aunque ésta última presenta esta tendencia, a partir del inicio de la temporada de secas, ya que en la temporada de lluvias presenta su valor más alto.

El Pb, solamente presenta similitud entre sus concentraciones de los dos sitios para el agua y el sedimento, para los cuales, se observa una tendencia descendente a partir de la época de lluvias hacia la de secas, mientras que para *Batophora spp.* en el sitio 1 es lo contrario, es decir se observa una tendencia ascendente de la temporada de lluvias hacia la de secas. No se detectó Pb, más que para octubre en *Bostrychia spp.*

El Zn únicamente presentó similitud entre las concentraciones entre sitios en el agua, ya que para los demás elementos esto no se observa. En general no se observan diferencias temporales marcadas entre el comportamiento entre sitios, lo cual es corroborado por el análisis estadístico, ya que en ninguno de los casos el Zn presentó diferencias estadísticamente significativas.

Así, en general cada metal presenta tendencias diferentes dependiendo del elemento y sitio de que se trate, por lo que no se puede hablar de un patrón definido para todos los metales en todos los elementos.

7.2. VARIACIÓN ESPACIAL

7.2.1. AGUA.

La tendencia general de las concentraciones promedio de metales en agua es $Pb > Fe > Cd = Zn$ (0.09, 0.02, 0.01 $\mu\text{g/ml}$), para los cinco sitios en los dos meses de estudio (Tabla 7.2.1.).

Cadmio.

Para el cadmio, las concentraciones promedio más altas se registraron para octubre, para los sitios 3 y 4 con 0.04 $\mu\text{g/ml}$. La concentración promedio más baja, 0.01 $\mu\text{g/ml}$, se registró en el mes de febrero en todos los sitios y en el sitio 1 para octubre. (Tabla 7.2.1.)

Gráficamente es posible observar un comportamiento espacial diferente para cada mes, ya que mientras que para octubre se puede observar un patrón espacial ascendente que va del sitio 1 al 4; para febrero sólo se registra un valor para todos los sitios (Figura 7.2.1.).

El análisis estadístico reveló que no existían diferencias estadísticas significativas entre sitios ($p > 0.05$).

Cobre.

Para el cobre, sólo se registraron dos valores, ambos en febrero para los sitios 1 y 5 con 0.01 $\mu\text{g/ml}$ (Tabla 7.2.1.).

Fierro.

Para el fierro, la concentración más alta se detectó en el sitio 1 en octubre (0.04 $\mu\text{g/ml}$), la concentración más baja se detectó en los sitios 4 y 5 en febrero con 0.01 $\mu\text{g/ml}$. No se detectó fierro en el sitio 3 en febrero (Tabla 7.2.1.)

Gráficamente es posible observar para ambos meses un patrón espacial descendente que va de sur a norte (Figura 7.2.1.).

El análisis estadístico reveló que no existían diferencias significativas entre sitios ($p>0.05$).

Plomo.

Para el plomo la concentración promedio más alta se detectó en el sitio 2 para octubre ($0.33 \mu\text{g/ml}$), la concentración mas baja se registró para el sitio 4 en febrero ($0.05 \mu\text{g/ml}$). (Tabla 7.2.1.)

Gráficamente se puede observar que octubre registra los valores más altos de las concentraciones de plomo, distinguiéndose dos picos, el primero en el sitio 2 y el segundo en el sitio 4. Para febrero el comportamiento de las concentraciones se muestra homogéneo, dada la falta de variación de las concentraciones de un sitio a otro. (Figura 7.2.1.)

El análisis estadístico reveló que no existían diferencias significativas entre sitios ($p>0.05$).

Zinc.

La concentración más alta de zinc se detectó en febrero, en el sitio 4 ($0.038 \mu\text{g/ml}$), la concentración más baja se registró para octubre en los sitios 1 y 3, $0.013 \mu\text{g/ml}$. (Tabla 7.2.1.)

De la gráfica es posible observar para febrero existe un gradiente ascendente en el mes, que va del sitio 1 al 4, para de octubre, sin embargo no es posible observar un gradiente definido ya que no se presento una variación marcada en sus concentraciones (Figura 7.2.1.).

El análisis estadístico reveló que no existían diferencias significativas entre sitios ($p>0.05$).

En general, no es posible percibir un comportamiento paralelo de las concentraciones en ambos meses, tampoco se observa un patrón definido para todos los metales, lo cual se corrobora con los resultados estadísticos, los cuales no fueron mostraron diferencias significativas para algún metal, es decir, que no existió variación significativa entre las concentraciones que permitiese observar un patrón o gradiente espacial (Figura 7.2.1.)

Tabla 7.2.1. Valores promedio de las concentraciones de metales pesados en agua en cinco sitios de la Bahía de Chetumal, octubre 1999 y febrero 2000. Las concentraciones están dadas en µg/ml.

| SITIO | OCTUBRE | | | | | FEBRERO | | | | |
|-------|----------------|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | Cd | Cu | Fe | Pb | Zn | Cd | Cu | Fe | Pb | Zn |
| 1 | 0.01 ±0.000 | N. D. | 0.04 ±0.000 | 0.20 ±0.000 | 0.01 ±0.007 | 0.01 ±0.007 | 0.01 ±0.000 | 0.03 ±0.007 | 0.03 ±0.007 | 0.01 ±0.007 |
| 2 | 0.03 ±0.00 | N. D. | 0.03 ±0.000 | 0.29 ±0.000 | 0.02 ±0.000 | 0.01 ±0.000 | N. D. | 0.03 ±0.007 | 0.04 ±0.007 | 0.01 ±0.000 |
| 3 | 0.04 ±0.000 | N. D. | 0.02 ±0.000 | 0.18 ±0.000 | 0.01 ±0.000 | 0.01 ±0.007 | N. D. | N. D. | 0.03 ±0.020 | 0.01 ±0.000 |
| 4 | 0.04 ±0.000 | N. D. | 0.02 ±0.000 | 0.24 ±0.000 | 0.02 ±0.000 | 0.01 ±0.007 | N. D. | 0.01 ±0.007 | 0.01 ±0.014 | 0.02 ±0.007 |
| 5 | 0.03 ±0.006 | N. D. | 0.03 ±0.000 | 0.18 ±0.000 | 0.02 ±0.000 | 0.01 ±0.007 | 0.01 ±0.007 | 0.01 ±0.007 | 0.03 ±0.021 | 0.01 ±0.000 |

N. D. No detectado.

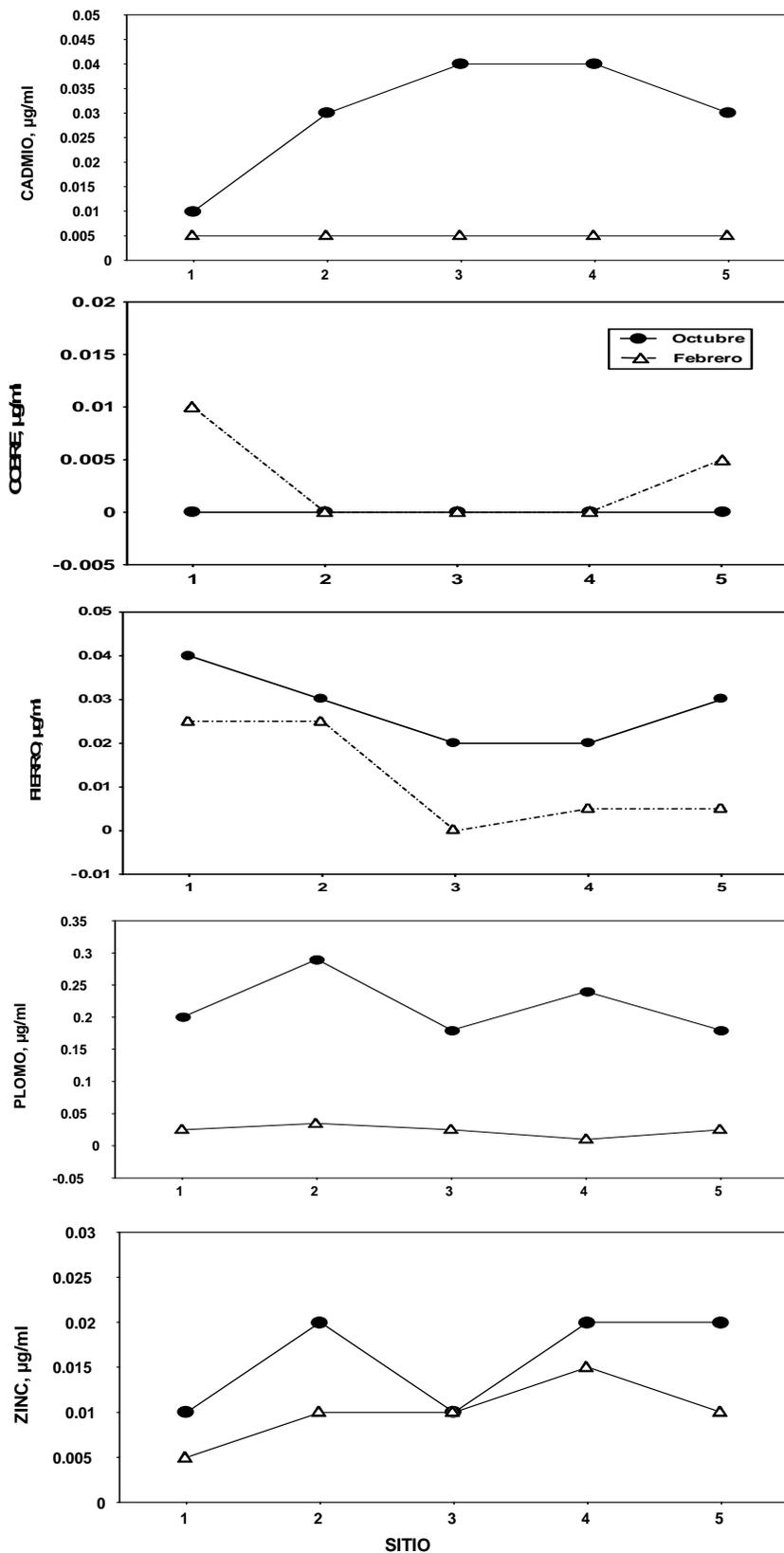


Fig. 7.2.1.-Niveles de metales pesados en agua, en cinco sitios de la Bahía de Chetumal, México. En los meses de octubre de 1999 y febrero de 2000.

7.2.2. SEDIMENTO.

En todos los meses la tendencia general de las concentraciones promedio de los metales pesados en sedimento en los cinco sitios analizados, fue: Fe>Pb>Zn>Cd>Cu, 542.61, 3.53, 3.21, 1.58, 1.30 µg/g, respectivamente.(tabla 7.2.2.).

Cadmio.

Para el cadmio, la concentración promedio más alta, 4.66 µg/g, se registró en octubre en los sitios 4 y 5. La concentración más baja, 0.25 µg/g, se registró en los sitios 2 y 5, para febrero. No se detectó cadmio para el mes de febrero en los sitios 3 y 4. (Tabla 7.2.2.)

En la gráfica es posible observar un comportamiento espacial diferente para cada mes. Solamente febrero es posible observar un gradiente espacial descendente que va del sitio 1 al sitio 5. (Figura 7.2.2.)

El análisis estadístico reveló que no existían diferencias significativas entre sitios ($p>0.05$).

Cobre.

La concentración promedio más alta de cobre se registró en el sitio 1, en febrero, 0.33 µg/g, la concentración más baja se detectó en febrero para el sitio 3, 0.13 µg/g. No se detectó cobre en sedimento en el sitio 5 en febrero. (Tabla 7.2.2.)

Gráficamente es posible observar un gradiente espacial descendente que va del sitio 1 al sitio 5, más visible para febrero que para octubre, lo cual se debe a la escasa variación que presentó en sus concentraciones (Figura 7.2.2.).

El análisis estadístico reveló que no existían diferencias significativas entre sitios ($p>0.05$).

Fierro.

La concentración promedio de fierro más alta se registró en el sitio 2, 1289.32 µg/g, en febrero, el valor más bajo se detectó en el sitio 5 en octubre, 1.33 µg/g (Tabla 7.2.2.).

De la gráfica es posible observar un comportamiento similar para ambos meses de las concentraciones de fierro en el sedimento, percibiéndose un patrón descendente en las concentraciones que va de sur a norte (Figura 7.2.2.).

El análisis estadístico reveló que no existían diferencias significativas entre sitios ($p > 0.05$).

Plomo.

Para el plomo, la concentración promedio más alta se encontró en sitio 1 en octubre, 12.31 µg/g. La concentración más baja se registró para febrero, en el sitio 5, 0.75 µg/g. (Tabla 7.2.2.)

De la gráfica es posible observar para octubre un gradiente espacial descendente que va del sitio 1 al sitio 4. Para febrero este gradiente descendente se observa del sitio 1 al sitio 5 (Figura 7.2.2.).

El análisis estadístico reveló que no existían diferencias significativas entre sitios ($p > 0.05$).

Zinc.

Para el zinc, la concentración promedio más alta se registró en el sitio 1 para el mes de octubre, 16.31 µg/g, la concentración más baja se detectó en octubre para el sitio 4, 0.83 µg/g. (Tabla 7.2.2.)

De la gráfica es posible observar un comportamiento similar para los sitios en ambos meses, es posible distinguir un gradiente espacial descendente que va del sitio 1 al sitio 5 (Figura 7.2.2.)

No obstante la diferencia entre la concentración encontrada en el sitio 1 en octubre con el resto de los meses, el análisis estadístico reveló que no existían diferencias significativas entre sitios ($p>0.05$).

En general, las concentraciones en ambos meses se mantuvieron paralelas a lo largo de los sitios, se observó una tendencia general de disminución de las concentraciones que va de sur a norte, con la excepción de Cd, en ambos meses, y el Pb, en octubre, para el sitio 5.

Así mismo se pudo observar una mayor variación entre las concentraciones del mes de octubre para el Pb y el Zn que para febrero, a pesar de ello, el análisis estadístico no reveló diferencias significativas entre sitios ($p>0.05$).

Tabla 7.2.2. Valores promedio de las concentraciones de metales pesados en sedimento en cinco sitios de la Bahía de Chetumal. Las concentraciones están dadas en µg/g peso seco.

| SITIO | OCTUBRE | | | | | FEBRERO | | | | |
|-------|----------------|----------------|--------------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|---------------------|----------------|----------------|
| | Cd | Cu | Fe | Pb | Zn | Cd | Cu | Fe | Pb | Zn |
| 1 | 3.50 ±0.000 | 2.17 ±0.000 | 477.14 ±0.000 | 12.31 ±0.000 | 16.31 ±0.000 | 2.37 ±3.352 | 3.00 ±0.704 | 829.75 ±808.768 | 3.37 ±1.941 | 5.75 ±6.005 |
| 2 | 3.50 ±0.000 | 1.50 ±0.000 | 562.96 ±118.715 | 4.66 ±0.000 | 2.50 ±0.000 | 0.25 ±0.354 | 2.13 ±2.884 | 1289.32 ±174.670 | 3.62 ±0.177 | 3.25 ±0.004 |
| 3 | 1.67 ±0.000 | 1.67 ±0.000 | 227.32 ±0.000 | 3.00 ±0.000 | 1.00 ±0.000 | N. D. | 0.13 ±0.174 | 317.11 ±16.737 | 2.13 ±0.884 | 1.00 ±0.354 |
| 4 | 4.66 ±0.000 | 1.00 ±0.000 | 274.76 ±0.000 | 1.17 ±0.000 | 0.83 ±0.000 | N. D. | 0.50 ±0.000 | 522.62 ±94.591 | 1.63 ±1.591 | 2.25 ±0.707 |
| 5 | 4.66 ±0.000 | 1.67 ±0.000 | 1.33 ±0.000 | 8.83 ±0.000 | 1.00 ±0.000 | 0.25 ±0.354 | N. D. | 339.02 ±7.382 | 0.75 ±1.061 | 1.00 ±1.061 |

N. D. No detectado.

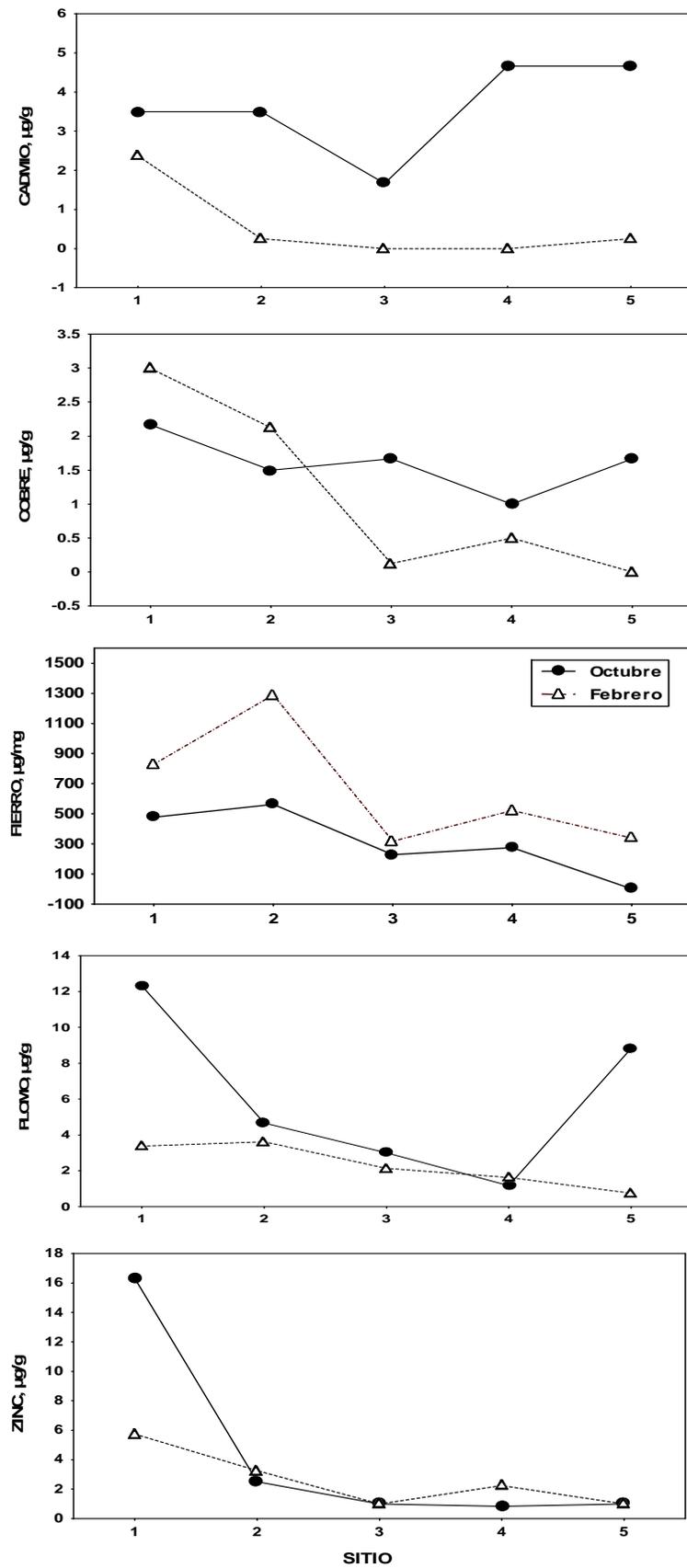


Fig. 7.2.2. Niveles de metales pesados en sedimento, en cinco sitios de la Bahía de Chetumal, México. En los meses de octubre de 1999 y febrero de 2000.

7.2.3. Batophora spp.

En todos los sitios la tendencia general de las concentraciones promedio de los metales pesados en *Batophora* spp. en los cinco sitios analizados, fue: Fe>Zn>Pb>Cu>Cd, 591.53, 3.96, 2.69, 1.65, 0.70 µg/g, respectivamente (Tabla 7.2.3).

Cadmio.

Para el cadmio, las concentraciones promedio más altas se registraron para febrero, detectándose el valor más alto en el sitio 4 con 1.67 µg/g, la concentración promedio más baja se registró para los sitios 3 y 5 en octubre, 0.33 µg/g. (Tabla 7.2.3.)

De la gráfica es posible observar un comportamiento espacial diferente para cada mes en las concentraciones de cadmio, tampoco es posible observar un patrón espacial definido para ninguno de ellos. (Figura 7.2.3.)

Lo anterior se ratifica con el análisis estadístico, que reveló que no existían diferencias significativas ($p>0.05$) entre los sitios.

Cobre.

Para el cobre, la concentración más alta se detectó en el sitio 1, en febrero, 2.67 µg/g, la más baja, 1.33 µg/g, se registró para el sitio 3 en febrero y el sitio 4 en los dos meses (Tabla 7.2.3.).

Gráficamente, es posible observar un comportamiento espacial similar para los dos meses (Figura 7.2.3), para ambos se observa un gradiente descendente que va del sitio 1 al sitio 5 (en este análisis se omite el sitio 2 en octubre, como se explica en la Tabla 7.2.3).

El análisis estadístico reveló que no existían diferencias significativas ($p>0.05$) entre sitios.

Fierro.

La concentración más alta de fierro se detectó en el sitio 2 en febrero (1072.79 $\mu\text{g/g}$), la concentración más baja se detectó en el sitio 4 en el mes de octubre (215.14 $\mu\text{g/g}$) (Tabla 7.2.3.)

De la gráfica es posible observar un comportamiento similar para ambos meses, con la excepción del sitio 1; es posible observar un gradiente descendente que va del sitio 1 al sitio 5 para octubre y del sitio 2 al 5 para febrero (Figura 7.2.3.).

El análisis estadístico reveló que no existían diferencias significativas ($p>0.05$) entre sitios.

Plomo.

La concentración promedio de plomo más alta se detectó en el sitio 5 en febrero (8.33 $\mu\text{g/g}$) y la concentración mas baja se registró en el sitio 3 en octubre (2.00 $\mu\text{g/g}$). No se detectó plomo en el sitio 1 en febrero y en los sitios 4 y 5 en octubre (Tabla 7.2.3)

Gráficamente se observó un comportamiento espacial diferente para cada mes; ya que mientras que para octubre se observa una tendencia general de aumento del sitio 1 al 5, en febrero esta tendencia es de disminución en las concentraciones.

El análisis estadístico reveló que no existían diferencias significativas ($p>0.05$) entre sitios.

Zinc.

Para el zinc la concentración máxima y mínima se registró para febrero, siendo la más alta en el sitio 2 (7.83 $\mu\text{g/g}$) y la más baja en el sitio 5 (0.25 $\mu\text{g/g}$) Tabla 7.2.3.

De la gráfica es posible observar un comportamiento espacial similar para los dos meses con la excepción del sitio 5, es posible observar un gradiente

descendente que va del sitio 1 al 5 para octubre, para febrero este gradiente se observa a partir del sitio 2 (en este análisis se omite el sitio 2 en octubre, como se explica en la Tabla 7.2.3, Figura 7.2.3.).

El análisis estadístico reveló que no existían diferencias significativas ($p>0.05$) entre sitios.

De forma general, únicamente las concentraciones de Cu se comportaron de forma paralela en los dos meses en todos los sitios, sin embargo, el Fe y Zn se comportaron de forma similar entre meses, por lo que se pudo observar en ambos una tendencia descendente de sur a norte para el Cu, Fe, y Zn (estos dos últimos mostraron esta tendencia a partir del sitio 2).

El Pb, en octubre también muestra tendencia descendente de norte a sur, pero en febrero esta tendencia es ascendente, el Cd, por el contrario, no mostró tendencias definidas para ninguno de sus sitios.

Pese a las tendencias observadas, las diferencias en las variaciones de los metales no fueron significativas para ninguno de los metales, ya que el análisis estadístico no reveló que existiesen diferencias estadísticas significativas ($p>0.05$) entre sitios.

Tabla 7.2.3. Valores promedio de las concentraciones de metales pesados en *Batophora* spp. en cinco sitios de la Bahía de Chetumal. Las concentraciones están dadas en µg/g peso seco.

| SITIO | OCTUBRE | | | | | FEBRERO | | | | |
|-------|----------------|----------------|--------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------------------|----------------|----------------|
| | Cd | Cu | Fe | Pb | Zn | Cd | Cu | Fe | Pb | Zn |
| 1 | N. D. | 2.17 ±0.578 | 677.66 ±37.292 | 4.49 ±2.590 | 5.99 ±1.803 | 1.17 ±0.288 | 2.67 ±0.288 | 918.53 ±429.732 | N. D. | 6.00 ±0.704 |
| 2 | - | - | - | - | - | 1.17 ±0.289 | 1.50 ±0.000 | 1072.79 ±76.511 | 5.83 ±4.252 | 7.83 ±2.565 |
| 3 | 0.33 ±0.288 | 1.50 ±0.000 | 444.39 ±52.646 | 2.00 ±1.802 | 2.50 ±0.864 | 1.17 ±0.298 | 1.33 ±0.288 | 0.02 ±0.024 | 3.33 ±3.819 | 3.50 ±0.866 |
| 4 | N. D. | 1.33 ±0.289 | 215.14 ±7.305 | N. D. | 2.33 ±1.040 | 1.67 ±0.288 | N. D. | 0.02 ±0.008 | 2.50 ±1.803 | 4.00 ±1.803 |
| 5 | 0.33 ±0.289 | 1.50 ±0.500 | 262.71 ±117.776 | N. D. | 2.67 ±2.362 | 1.17 ±0.288 | N. D. | 0.11 ±0.044 | 8.33 ±3.372 | 0.25 ±0.354 |

- No se realizó el análisis, por lo que en el análisis de las gráficas se omitirá el sitio dos para el mes de octubre, ya que el programa utilizado para generar las gráficas no admite la ausencia de un código (datos de un mes) para realizar las mismas, así que se les asignó valores de cero para generarlas.

-N. D. No detectado.

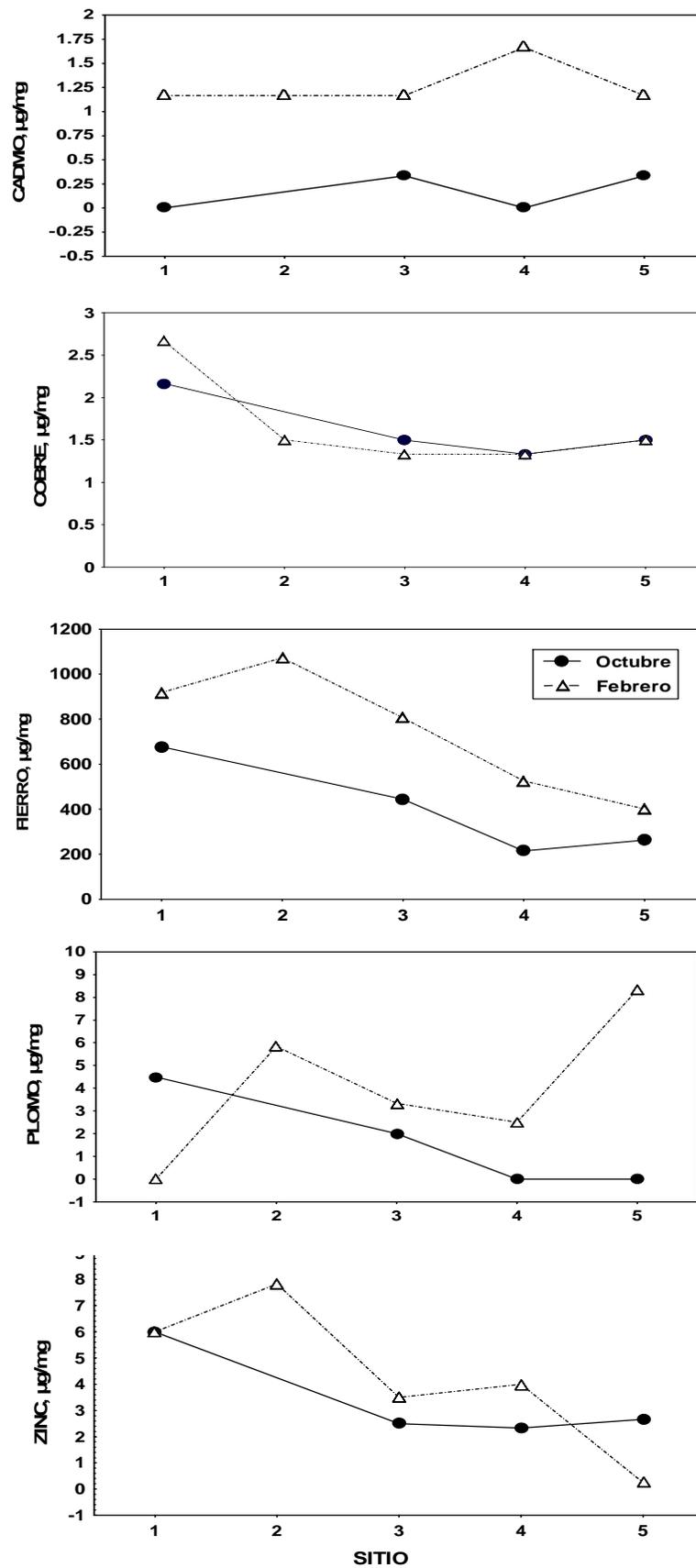


Fig. 7.2.3-Niveles de metales pesados en *Batophora sp.*, en cinco sitios de la Bahía de Chetumal, México. En los meses de octubre de 1990 y febrero de 2000.

7.2.4. *Bostrychia* spp.

En todos los sitios la tendencia general de las concentraciones promedio de los metales pesados en *Bostrychia* spp. en los cinco sitios analizados, fue: Fe>Zn>Cd>Cu, 558.11, 3.26, 2.04, 1.21 µg/g, respectivamente. (Tabla 7.2.4).

Cadmio.

La concentración promedio más alta de cadmio se registró para el mes de febrero, en el sitio 3 (4.17 µg/g), la concentración promedio de cadmio más baja se registró para el sitio 4 en febrero con 1.67 µg/ml (Tabla 7.2.4.)

De la gráfica es posible observar un comportamiento espacial diferente para cada mes; mientras que para octubre se observa un gradiente espacial ascendente que va del sitio 2 al 5, para febrero, solamente se observa una marcada tendencia hacia la disminución del sitio 3 al 5. (Figura 7.2.4.)

Pese a lo anterior el análisis estadístico reveló que no existían diferencias significativas entre sitios ($p>0.05$).

Cobre.

La concentración más alta de cobre se detectó en el sitio 4, en febrero con 2.00 µg/g y la más baja en fue de 0.17 µg/g en el sitio 5, en febrero. (Tabla 7.2.4.)

Gráficamente es posible observar un comportamiento espacial diferente para cada mes; para octubre es posible observar un gradiente descendente que va del sitio 1 al 4 mientras que para febrero, para esos mismos sitios se observa una tendencia ascendente. (Figura 7.2.4.)

El análisis estadístico reveló que no existían diferencias significativas entre sitios ($p>0.05$).

Fierro.

La concentración más alta de fierro se detectó en el sitio 1 en octubre, 1042.80 $\mu\text{g/g}$ y la concentración más baja se detectó en el sitio 5 en ese mismo mes, 53.80 $\mu\text{g/g}$ (Tabla 7.2.4)

De la gráfica es posible observar un comportamiento espacial similar para los dos meses; para ambos es posible observar una tendencia espacial descendente que va del sitio 1 al 5 (Figura 7.2.4)

El análisis estadístico mostró que existen diferencias significativas entre los sitios ($p < 0.05$), estas diferencias se observaron principalmente en el mes de octubre en el sitio 1 (Figura 7.2.4).

Plomo.

El plomo únicamente se detectó en octubre en el sitio 3 con 0.02 $\mu\text{g/g}$ (Tabla 7.2.4).

Zinc.

La concentración más alta de zinc se detectó en febrero, en el sitio 4 con 9.67 $\mu\text{g/g}$ y la concentración más baja se registró para octubre en el sitio 5 con 0.17 (Tabla 7.2.4).

De la gráfica es posible observar un comportamiento espacial similar para ambos meses, con excepción del sitio 5, es posible observar un gradiente espacial ascendente que va del sitio 1 al 5 para febrero, y del sitio 1 al 4 para octubre (Figura 7.2.4).

El análisis estadístico reveló que existían diferencias significativas ($p > 0.05$) entre meses las cuales se observan principalmente en el mes de febrero en los sitios 4 y 5 con el resto de los meses.

En general es posible observar que sólo el fierro presentó un patrón espacial paralelo en todos sus sitios para ambos meses y que el Zn mostró un comportamiento similar de sus concentraciones en los dos meses, por lo que no se puede hablar de un patrón definido para todos los metales.

Para octubre, el Cu y Fe mostraron tendencia a la disminución en sus concentraciones de sur a norte, mientras que para el Cd, en este mes, las concentraciones disminuyeron de norte a sur, lo mismo ocurrió para el Zn, principalmente para febrero.

Estadísticamente solamente el Fe y el Zn presentaron diferencias significativas ($p > 0.05$) entre sitios, lo cual se observa gráficamente, ya que son los que mostraron las tendencias más marcadas (aunque las tendencias fueron contrarias entre ellas), lo que no sucedió con los otros metales, cuya variación fue menos significativa.

Tabla 7.2.4. Valores promedio de las concentraciones de metales pesados en *Bostrychia* spp. en cinco sitios de la Bahía de Chetumal. Las concentraciones están dadas en µg/g peso seco.

| SITIO | OCTUBRE | | | | | FEBRERO | | | | |
|-------|----------------|----------------|--------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------------------|-------|-----------------|
| | Cd | Cu | Fe | Pb | Zn | Cd | Cu | Fe | Pb | Zn |
| 1 | 2.33 ±0.289 | 1.67 ±0.289 | 1042.80 ±66.445 | N. D. | 1.67 ±0.289 | 3.83 ±0.289 | 1.00 ±0.500 | 720.71 ±43.197 | N. D. | 1.17 ±0.288 |
| 2 | 2.17 ±0.577 | 1.67 ±0.289 | 213.43 ±19.095 | N. D. | 3.00 ±0.707 | 4.00 ±0.001 | 0.67 ±0.288 | 169.26 ±13.973 | N. D. | 3.83 ±0.765 |
| 3 | 2.67 ±0.288 | 1.33 ±0.289 | 436.76 ±86.042 | 0.02 ±0.029 | 2.00 ±0.001 | 4.17 ±0.289 | 1.67 ±0.289 | 663.41 ±65.513 | N. D. | 5.16 ±1.153 |
| 4 | 3.17 ±0.288 | 0.67 ±0.577 | 196.44 ±42.768 | N. D. | 4.99 ±0.000 | 1.67 ±0.289 | 2.00 ±0.500 | 373.29 ±61.809 | N. D. | 9.67 ±0.766 |
| 5 | 3.66 ±0.578 | 1.00 ±0.00 | 53.80 ±19.775 | N. D. | 0.17 ±0.289 | 2.00 ±0.000 | 0.17 ±0.289 | 210.26 ±42.184 | N. D. | 9.75 ±10.251 |

N. D. No detectado.

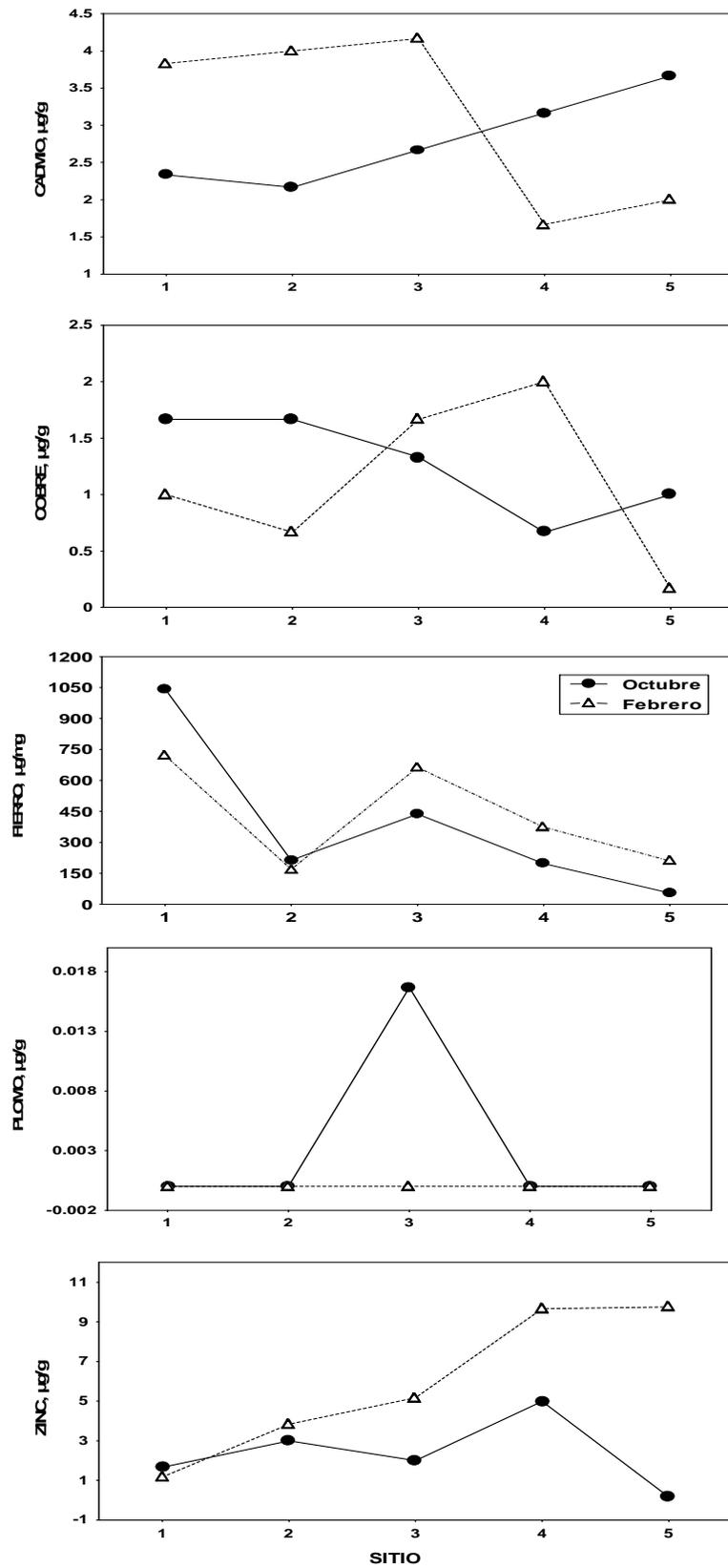


Fig. 7.2.4.-Niveles de metales pesados en *Bostrychia* spp., en 5 sitios de la Bahía de Chetumal, México. Octubre 1990 y febrero 2000.

7.3. FACTOR DE BIOCONCENTRACIÓN

7.3.1. Variación Temporal

7.3.1.1 *Batophora* spp./Agua

Los valores de los factores de bioconcentración para *Batophora* spp. mostraron la siguiente tendencia general: Fe>Zn>Cd>Pb, 154,781.67, 2,298.70, 366.53, y 221.99, respectivamente (Tabla 7.3.1.)

El cadmio tuvo su valor más alto en marzo para el sitio 3, 366.53; el cobre no presentó valores, con excepción de febrero para el sitio uno, 266.57; para el fierro el valor más alto se fue en el sitio 3 para marzo 154,781.67; el plomo En enero no se presentaron valores para el sitio tres para alguno de los metales, y para el sitio uno sólo se presentaron valores para el fierro y plomo. Cada uno de los metales presentó una variación temporal diferente para cada sitio.

7.3.1.2. *Bostrychia* spp./Agua

La tendencia general de los valores de los factores de bioconcentración fue: Fe>Zn=Cd>Cu>Pb; 1,614.00, 16.67; 2.00 y 0.02, respectivamente.

Al igual que lo sucedido con la *Batophora* spp., febrero es el único que presenta valores para el cobre y el mes de enero no presenta valores de alguno de los metales para el sitio tres, sin embargo tampoco presenta valores para el sitio uno, con excepción del fierro. A diferencia de lo ocurrido con el comportamiento de los factores de bioconcentración para *Batophora* spp. para el plomo, este metal sólo presentó valores para octubre en el sitio tres.

Para ambas especies los valores de los factores de bioconcentración mostraron una tendencia general similar, sin embargo *Batophora* spp. presentó valores para cada metal más altos que *Bostrychia* spp. y una diferencia notable observada es que esta última especie, no acumuló Pb en su tejido en sitio ni temporada del año, con la excepción del valor que presenta en octubre para el sitio tres.

Tabla 7.3.1.1. Factores de bioconcentración del alga *Batophora* spp./agua de las concentraciones de metales pesados en dos sitios de la Bahía de Chetumal, octubre 1999, enero a mayo 2000.

| MES | SITIO 1 | | | | | SITIO 3 | | | | |
|-----|---------|--------|-----------|--------|----------|---------|----|-----------|--------|----------|
| | Cd | Cu | Fe | Pb | Zn | Cd | Cu | Fe | Pb | Zn |
| OCT | – | – | 16,941.56 | 22.47 | 599.40 | 8.33 | – | 22,219.33 | 16.66 | 249.83 |
| ENE | – | – | 94,979.13 | 3.92 | – | – | – | – | – | – |
| FEB | 233.20 | 266.57 | 36,741.23 | – | 1,199.60 | 233.27 | – | – | 133.31 | 349.90 |
| MAR | 149.90 | – | – | 221.99 | – | 366.53 | – | 154,781.6 | 93.27 | 166.53 |
| ABR | 177.69 | – | 75,820.75 | 115.04 | 66.60 | 224.95 | – | 22,920.39 | – | 599.50 |
| MAY | 66.63 | – | 117,505.0 | 213.55 | – | 158.27 | – | 19,733.93 | 24.24 | 2,298.70 |

Tabla 7.3.1.2. Factor de bioconcentración alga *Bostrychia* spp./agua de las concentraciones de metales pesados en dos sitios de la Bahía de Chetumal, octubre 1999, enero a mayo 2000.

| MES | SITIO 1 | | | | | SITIO 3 | | | | |
|-----|---------|------|--------|----|-------|---------|----|----------|------|-------|
| | Cd | Cu | Fe | Pb | Zn | Cd | Cu | Fe | Pb | Zn |
| OCT | 4.67 | – | 521.50 | – | 3.33 | 1.33 | – | 436.83 | 0.02 | 4.00 |
| ENE | – | – | 333.67 | – | – | – | – | – | – | – |
| FEB | 15.33 | 2.00 | 576.80 | – | 4.67 | 16.67 | – | – | – | 10.33 |
| MAR | 3.67 | – | – | – | 10.33 | 4.67 | – | 1,614.00 | – | 2.33 |
| ABR | 1.33 | – | 702.00 | – | 9.00 | 0.17 | – | 144.25 | – | 9.00 |
| MAY | 0.17 | – | 872.50 | – | – | 0.17 | – | 82.33 | – | 16.67 |

– Valor del factor no calculable.

7.3.2. Variación Espacial.

7.3.2.1. *Batophora* spp./Agua

Los valores de los factores de bioconcentración para *Batophora* spp. observaron la siguiente tendencia general: Fe>Zn>Cd>Cu>Pb, 105,052.00, 1,199.60, 333.27, 333.20 y 299.80, respectivamente.

Cada metal presentó una variación espacial diferente para cada mes.

El cadmio presentó valores similares para todos los sitios con excepción del sitio cuatro para febrero, en este mes se observó que el sitio cinco presentó valores para todos los metales, lo cual no sucedió con los demás sitios.

El cobre no presenta valores en el mes de octubre para ninguno de los sitios, para febrero se presenta sólo en los sitios uno y cinco.

7.3.2.2. *Bostrychia* spp. /Agua

La tendencia general de los valores de los factores de bioconcentración fue: Fe>Zn>Cd>Cu>Pb; 1,493.33, 60, 16.67, 2.00 y 0.02, respectivamente.

Al igual que *Batophora* spp., cada metal presenta un variación espacial diferente para cada mes, sin embargo a diferencia de la *Batophora* spp., no se presentan valores de bioconcentración para el cobre y plomo, con excepción del sitio uno, para el de octubre, en el caso del cobre y el sitio tres en el mes de febrero, en el caso del plomo.

Como se puede observar los valores más altos reportados para *Bostrychia* spp. son más bajos en comparación con los valores reportados para *Batophora* spp., lo cual concuerda con el comportamiento temporal que se presentó para los factores de bioconcentración, para ambos meses, en todos los sitios.

No obstante lo anterior, la variación espacial fue más estable en cuanto a presencia de valores para *Bostrychia* spp. ya que en el caso del cobre cadmio,

fierro y zinc, se presentaron valores en ambos meses para todos los sitios, con una excepción para el fierro el mes de febrero para el sitio tres.

Tabla 7.3.2.1. Factor de bioconcentración alga *Batophora* spp. de las concentraciones de metales pesados en cinco sitios de la Bahía de Chetumal, octubre 1999 y febrero 2000.

| SITIO | OCTUBRE | | | | | FEBRERO | | | | |
|-------|---------|----|-----------|-------|--------|---------|--------|----------------|--------|----------|
| | Cd | Cu | Fe | Pb | Zn | Cd | Cu | Fe | Pb | Zn |
| 1 | – | – | 16,941.56 | 22.45 | 599.40 | 233.20 | 266.57 | 36,741.23 | – | 1,199.60 |
| 2 | * | * | * | * | * | 233.33 | – | 42,911.41 | 166.63 | 783.17 |
| 3 | 8.33 | – | 22,219.33 | 11.11 | 249.83 | 233.27 | – | – | 133.31 | 349.90 |
| 4 | – | – | 10,756.93 | – | 116.65 | 333.20 | – | 105,052.0 0 | 249.91 | 266.58 |
| 5 | 11.11 | – | 8,757.01 | – | 133.25 | 233.13 | 299.80 | 80,344.87 | 333.27 | 25.00 |

Tabla 7.3.2.2. Factor de bioconcentración del alga *Bostrychia* spp./agua de las concentraciones de metales pesados en cinco sitios de la Bahía de Chetumal, octubre 1999 y febrero 2000.

| SITIO | OCTUBRE | | | | | FEBRERO | | | | |
|-------|---------|----|--------|------|------|---------|------|----------|----|-------|
| | Cd | Cu | Fe | Pb | Zn | Cd | Cu | Fe | Pb | Zn |
| 1 | 4.67 | – | 521.50 | – | 3.33 | 15.33 | 2.00 | 576.80 | – | 4.67 |
| 2 | 1.44 | – | 142.33 | – | 3.00 | 16.00 | – | 135.47 | – | 7.67 |
| 3 | 1.33 | – | 436.83 | 0.02 | 4.00 | 16.67 | – | – | – | 10.33 |
| 4 | 1.58 | – | 196.50 | – | 2.50 | 3.33 | – | 1,493.33 | – | 12.89 |
| 5 | 2.44 | – | 35.89 | – | 0.17 | 8.00 | – | 841.33 | – | 60.00 |

– Valor del factor no calculable.

* Los valores de la concentración de metales en el organismo no existen, debido a que la muestra correspondiente se perdió.

7.4. CORRELACIÓN DE SPEARMAN

7.4.1. Temporal

Se encontraron correlaciones significativas ($p < 0.05$) entre las concentraciones de Cd en las dos especies de macroalgas y columna de agua, sin embargo en el caso de *Batophora* spp., ésta fue positiva y para *Bostrychia* spp., negativa.

Tabla 7.4.1. Factor de correlación de Spearman entre las concentraciones de Cd en agua y las macroalgas *Batophora* spp. y *Bostrychia* spp. En dos sitios.

| Alga | R | p |
|------------------------|-----------|----------|
| <i>Batophora</i> spp. | 0.594329 | 0.041555 |
| <i>Bostrychia</i> spp. | -0.647689 | 0.022769 |

Las concentraciones de Cd, Cu y Fe en sedimento mostraron correlación con las detectadas en el alga *Batophora* spp. (Tabla 7.4.2). Para *Bostrychia* spp. no se observaron correlaciones significativas ($p > 0.05$) con el sedimento.

Tabla 7.4.2. Factor de correlación de Spearman entre las concentraciones de metales en sedimento y *Batophora* spp. En dos sitios.

| Metal | R | p |
|-------|-----------|----------|
| Cd | -0.621912 | 0.030838 |
| Cu | 0.622356 | 0.030683 |
| Fe | 0.699301 | 0.011347 |

7.4.2. Espacial

No se encontraron correlaciones significativas ($p > 0.05$) entre las concentraciones de metales en las dos especies de macroalgas y columna de agua.

Las concentraciones de Cd, Cu, Fe y Zn en sedimento mostraron correlación con las detectadas en el alga *Batophora* spp. (Tabla 7.4.2.). Para *Bostrychia* spp. no se observaron correlaciones significativas ($p > 0.05$) con el sedimento.

Tabla 7.4.2. Factor de correlación de Spearman entre las concentraciones de metales en sedimento y *Batophora* spp. en cinco sitios.

| Metal | R | p |
|-------|-----------|----------|
| Cd | -0.831777 | 0.005431 |
| Cu | 0.756820 | 0.018234 |
| Fe | 0.783333 | 0.012520 |
| Zn | 0.844277 | 0.004199 |

En ambos casos, en la variación temporal y la espacial se pudo observar que existe una correlación significativa entre el alga *Batophora* spp. y el sedimento, aunque no para todos los metales.

El Cd mostró un comportamiento para la variación temporal y otro para la variación espacial, ya que, aunque muestra correlación entre el agua y las dos especies de macroalgas (positiva y negativa respectivamente) en la variación temporal, en la variación espacial, fue el único metal que muestra una correlación negativa (Tabla 7.4.1.).

8. DISCUSIÓN

8.1. AGUA.

8.1.1. Variación temporal.

La variación temporal que presentó el Cd (gradiente ascendente hacia la temporada de secas), podría estar relacionado a que el Cd, en algunas áreas, se relaciona con la concentración de nutrientes, es decir, la concentración del metal es reducida en las temporadas de crecimiento de las algas, en las cuales la concentración de metales en algas muestra picos en los meses posteriores a este proceso, y bajas concentraciones, por el contrario, en éstos (Leal, et al, 1997).

En este estudio, las concentraciones en las algas mostraron dicho proceso. Aunado a lo anterior, su comportamiento temporal también podría deberse a una continua liberación del Cd, por el sedimento, lo que sería factible debido a la baja profundidad del área de estudio.

El Fe, presenta un comportamiento temporal irregular lo que dificulta su asociación a una fuente específica. En el mes de octubre su presencia en ambos sitios, es factible por la temporada de lluvias, sin embargo en los meses de abril y mayo, en el sitio 3 es probable que este asociada a la actividad antropogénica recreativa, ya que en este sitio se encontraron una mayor cantidad y variedad como hilos, pelusas de algodón, pedazos de plástico y cordel basura enredados al alga *Bostrychia spp.* en comparación con los otros sitios.

El Pb, por la distribución temporal que presentó (descendente hacia la temporada de secas), sugiere una asociación principal con la temporada de lluvias, concordando con Páez–Osuna (1996 b), el cual considera que, dependiendo de las condiciones climáticas prevalecientes, los particulados atmosféricos con contenidos metálicos importantes, pueden ser transportados por los vientos a grandes distancias, estando sujetos a eventos que finalmente los depositan en la litosfera por precipitación directa, pluvial o incluso nevadas, sobresaliendo el aporte del plomo.

El Zn presentó un comportamiento temporal casi homogéneo, lo que nos sugiere que la introducción del Zn al sistema con respecto al tiempo se mantiene constante y continua.

8.1.2. *Variación espacial.*

Para el Cd por el gradiente espacial presentado, probablemente se encuentra asociado a las aguas de desecho doméstico y a las actividades agrícolas, las cuales constituyen uno de los más grandes contribuyentes potenciales de fuentes no puntuales de metales debido a que los aportes de los metales se generan desde grandes extensiones de tierra, que pueden conducir a la contaminación ambiental de los sistemas acuáticos (Páez–Osuna, 1996).

El hecho de que no se detectara cobre, con la excepción de dos sitios para el mes de febrero, su aparición en el sitio 1 es atribuible a su cercanía a la zona urbana, con respecto al sitio 5, es más difícil explicar su presencia en un lugar que se consideraría impoluto, sin embargo debido a su capacidad de formar complejos fácilmente con una gran variedad de sustancias que se hallan tanto en aguas limpias y aquellas consideradas contaminadas, Páez–Osuna, (1996 a), su presencia podría deberse a esta propiedad.

El Fe presentó una distribución similar en los dos meses. En ambos, su distribución parece asociarse con la cercanía a fuentes antropogénicas (valor más alto en el sitio 1 y desciende gradualmente en los sitios subsecuentes) probablemente debido a que el Fe es un metal que se halla principalmente ligado a las descargas de aguas residuales, que lo contienen en diversos productos, entre ellos, los detergentes, de los cuales la Bahía de Chetumal es receptora, Ortiz y Sáenz (1996), también parece influir la temporada de lluvias ya que presentó valores más altos en octubre que en febrero. Su aparición en los sitios 4 y 5, probablemente sea debido al aporte de la aplicación de fertilizantes y el lavado de las tierras erosionadas, que a la introducción antropogénica.

El Plomo, presentó valores más altos en octubre que en febrero, lo cual podría deberse a la temporada de lluvias. La distribución espacial que se encontró,

especialmente en el mes de octubre es atribuible a la cercanía no inmediata de las fuentes contaminantes, para el sitio 2, la Ciudad de Chetumal y para el sitio 4, el del poblado de Luis Echeverría y zonas aledañas, dicho comportamiento se considera particular para el Pb, por las distancias que puede recorrer; Turner (1994), nos dice que las partículas metálicas del Pb están asociadas a un tamaño de $<1\mu\text{m}$ de diámetro, con tiempos de residencia atmosférica de siete días, lo que les permite su transportación a miles de km.

En el caso el Zn, la distribución espacial que presentó sugiere una asociación con a la actividad agrícola (especialmente los fertilizantes fosforados), con influencia de la temporada de lluvias.

Las variaciones espaciales y temporales que presentaron los cinco metales analizados sugieren que cada metal se asocia a diversas fuentes y no a una en específico.

Para el Cd, los altos valores obtenidos en el agua, podrían atribuirse a las mismas fuentes que influyen en el sedimento, mencionadas por Álvarez–Legorreta y Sáenz (1998) y Álvarez, et. al, (2000), es decir, de las aguas residuales, de la actividad agrícola por el uso de fertilizantes fosfatados ricos en Cd, Fe y Zn, de la pintura de lanchas y de procesos naturales como el lavado de tierras erosionadas. Su comportamiento temporal sugiere una asociación al crecimiento de las algas y una liberación por el sedimento y en su comportamiento espacial a fuentes no puntuales, dado lo anterior, no es posible asociarlo a una fuente única.

Los valores encontrados son de riesgo, ya que superan los detectados para áreas consideradas con fuerte influencia industrial y/o petrolera, y los límites permisibles para descargas en estuarios (Tabla 8.1.1.), asimismo, se encuentran por arriba de los determinados como letales en estudios de afectación en organismos marinos por Cd; evaluando los efectos del Cd en la respiración y sobrevivencia del cangrejo *Callinectes similis*, la CL_{50} (96 hr) fue de 6.35 mg/l y 73.69 mg/L, en la diatomeas *Asterionella formosa*, se encontró que 2 mg/L de Cd reducen su crecimiento, a concentraciones de 10 mg/L, lo inhiben en un día. En el plancton, la fotosíntesis del fitoplancton y la producción primaria es reducida por

concentraciones de 0.2 mg/L, y la comunidad del zooplancton es afectada en su estructura en concentraciones de 5 mg/L o menos (Ramirez et al, 1989, Conway, 1978, Marshall y Mellinger, 1980, En: Páez–Osuna, 1996).

En el caso del Cu, dados los resultados obtenidos en ambos estudios de variaciones, se dificulta establecer una fuente contaminante, sin embargo su presencia podría estar relacionada principalmente con las descargas de aguas residuales y que debido a sus características químicas ya mencionadas, es probable que su distribución espacial y temporal se haya visto afectada.

Respecto a los valores encontrados, los efectos del cobre sobre los invertebrados marinos son usualmente observados en concentraciones de 0.01 y 1.0 ppm (Taylor, 1979, En: Páez–Osuna, 1996), no obstante, la toxicidad del Cu se debe principalmente a su forma iónica, Cu (II), lo que imposibilita manifestar que las cantidades encontradas sean tóxicas, por otra parte hay que considerar que el Cu es un elemento que se halla abundantemente en cuerpos de agua no contaminada y en este caso no fue así. Ambos aspectos sugieren que el contenido de Cu detectado en el agua, probablemente no este reflejando la realidad de dicho metal en la Bahía.

Para el Fe, considerando los resultados en los estudios de ambas variaciones es factible relacionarlo con una fuente principal, la afectación antropogénica, ya sea por descargas de aguas residuales o actividades recreativas, en temporada de lluvias o secas y en menos medida al lavado de tierras. Los valores encontrados se encuentran por debajo de los límites permisibles para aguas costeras (SEDUE, 1990), por lo que no representan un problema para la Bahía de Chetumal (Tabla 8.1.1.).

La distribución espacio–temporal que presentó el Pb, le asocia principalmente a dos fuentes, en primera estancia al aporte atmosférico y en segunda, al aporte antropogénico.

Las concentraciones detectadas de Pb, resultan altas; se ha determinado en estudios sobre el efecto del Pb en el crustáceo *Daphnia magna*, que en concentraciones de 0.02-0.05 mg/L, disminuye su movilidad y resulta letal a los 30 días (Moreno–Sánchez et al, 1999), sin embargo, se debe considerar que la

mayoría de las sales del metal son muy poco solubles, de ahí que la toxicidad aguda sea imposible de observarse bajo condiciones naturales, ya que su toxicidad está influida por la dureza de las aguas, pH y la presencia de materia orgánica, por lo que la concentración del Pb en invertebrados marinos debe ser mayor a 1 ppm para que pueda ser observada cualquier respuesta tóxica aguda (Páez–Osuna, 1996).

No obstante lo anterior, la presencia del Pb, así como las altas concentraciones que presentó (Tabla 8.1.1.), son un factor que debe ser tomados en cuenta para el futuro de la Bahía de Chetumal.

Tabla 8.1.1. Niveles de metales ($\mu\text{g/ml}$) en aguas superficiales de áreas costeras del Golfo de México y Europa. Fracción disuelta. Los valores en paréntesis corresponden a la desviación estándar.

| Lugar | Cd | Cu | Fe | Pb | Zn |
|---|----------------------|--------------------|------------------|---------------------|-------------------|
| Madre, Tamp. ¹ | 0.00060 (0.20) | 0.0025 (0.5) | — | — | 0.0015 (1.0) |
| Términos, Campeche. ¹ | 0.00015 (0.07) | 0.0016 (1.4) | 0.0086 (7.14) | 0.0018 (0.5) | — |
| Plataforma Continental del G. de México. | | 0.0014 (1.8) | | | 0.0036 (2.7) |
| Costa Nor-Occidental del G. de México. ¹ | <0.00020 | <0.0002 <0.0009 | 0.018 | — | 0.0025 |
| Costa Oriental del G. de México. ¹ | 0.001 | — | — | — | 0.0026 |
| Costa de Bélgica y Alemania. ² | 0.000013- 0.00039 | 0.00013- 0.015 | — | 0.000041- 0.0075 | — |
| Costa de Oporto, Portugal. ² | 0.0011- 0.0016 | 0.0015- 0.0020 | — | 0.0015- 0.0020 | 0.0017- 0.0038 |
| B. de Chetumal, este estudio (Var. temporal) | 0.02 (0.016) | — | 0.02 (0.016) | 0.06 (0.056) | 0.01 (0.005) |
| B. de Chetumal, este estudio (Var. espacial) | 0.01 (0.014) | — | 0.02 (0.013) | 0.09 (0.098) | 0.01 (0.006) |

¹Villanueva y Páez-Osuna (1996); ²Leal et al, 1997.

El Zn, a diferencia de los demás metales, presentó un comportamiento temporal que no concuerda con el espacial, por lo que se dificulta establecer una fuente probable, una explicación podría ser su rápida incorporación al sistema, haciendo que la variabilidad temporal parezca constante, el Zn puede ser fuertemente enriquecido y sedimentado por el fitoplancton (Presley et al, En: Villanueva y Páez–Osuna, 1996), pudiendo este fenómeno estar sucediendo en la Bahía.

En cuanto a los valores encontrados, en su mayoría se encuentran dentro de los límites permisibles (SEDUE, 1990).

8.2. SEDIMENTO

8.2.1. Variación temporal.

Los sedimentos reflejan el carácter general del material transportado por los ríos de las áreas terrestres adyacentes, los derivados de la erosión de la línea de costa, llevados por las corrientes marinas desde fuentes externas, la producción in situ por los organismos, y el aporte antropogénico (Rubio et al, 2000), por lo que representan un panorama general de la alteración que sufre un sistema con respecto al tiempo.

Con la excepción del Cd y el Cu, para los que se observó un gradiente temporal similar para ambos sitios con un pico en enero, cada metal mostró un comportamiento diferente, por lo que no se puede establecer un patrón de acumulación único para todos los metales.

Pese a lo anterior, este patrón temporal descendente percibido para el Cd, Cu y Pb, ya fuera a partir de enero u octubre, podría significar que existe una liberación continua hacia la columna de agua, al menos en el caso del Cd, que presentó un gradiente temporal ascendente a partir de enero en sus concentraciones en el agua, otra explicación podría deberse a la acción de los carbonatos, los cuales tienen un efecto diluyente sobre los metales que tienen origen terrestre (Rubio et al, 2000).

Pérez (1999) no encontró una variación temporal marcada, lo cual atribuyó a que el sistema es respecto al tiempo, un estado estacionario y que no existe una tasa de acumulación neta.

8.2.2. *Variación espacial.*

Por el comportamiento espacial de las concentraciones de metales en sedimento, con la excepción del Fe y Cd, se puede deducir que la afectación se relaciona principalmente con el aporte antropogénico.

El comportamiento espacial del Cd difiere entre los dos meses; para el mes de octubre, los valores más altos se registran en los sitios 4 y 5, esto podría estar asociado con el aporte proveniente de Laguna Guerrero, que por la época de lluvias arrastra consigo el material proveniente de las tierras de cultivo. Para el mes de febrero, por el contrario el comportamiento espacial se relaciona con el aporte de aguas residuales provenientes de la Ciudad de Chetumal.

El comportamiento de las concentraciones de Cu en ambos meses muestra tendencia al aporte antropogénico. Para octubre, sin embargo esta tendencia no es tan clara como para febrero. Su presencia en el sitio 3 podría deberse a su relación con la materia orgánica ya que el cobre manifiesta una fuerte relación con la materia orgánica, lo que parece ser una propiedad general del cobre en aguas y sedimentos naturales de las áreas costeras (Paéz-Osuna y Villanueva, 1996), y para ese sitio se han reportado valores más altos de materia orgánica que en los otros sitios (De Jesús et al, 2000).

El Hierro a diferencia de los otros metales no parece estar relacionado con el aporte antropogénico por el tipo de distribución espacial que presentó. Al igual que el Cd, presentó el mismo comportamiento para ambos meses, por lo que su distribución espacial no parece ser afectada por la temporada de lluvias. Una explicación podría ser que el Fe presenta una fuerte tendencia hacia la movilización en función de las condiciones de óxido-reducción interperantes en la interfase agua-sedimento (Paéz-Osuna y Villanueva, 1996), por lo que su distribución podría estar más asociada a las condiciones imperantes del sistema

más que por el aporte antropogénico. Pérez (1999), en su estudio nos ofrece otra explicación; considerando que encontró valores tan altos de Fe en una de sus estaciones que consideró como impoluta como en la zona atribuyó dicha aparición a afectaciones externas a los sistemas naturales.

La distribución espacial del Pb, fue distinta para cada mes, presentando las más altas concentraciones en el mes de octubre, lo cual sugiere relación con la temporada de lluvias, ya que ocurrió lo mismo con los valores de Pb en la columna de agua. Para febrero, el comportamiento espacial al parecer se relaciona con la afectación antropogénica, ya que presenta un gradiente descendente a hacia el norte, partiendo del sitio 1, adyacente a la ciudad de Chetumal.

El Zn en sedimento por el tipo de distribución espacial que presentó, similar al Pb en temporada de secas, parece relacionarse más con la afectación antropogénica que con otra posible fuente.

Considerando que el Fe, Cu, Pb y Zn, son metales relacionados principalmente con la introducción antropogénica y reflejan la compleja naturaleza de la materia orgánica (Rubio et al, 2000), y con base en los resultados obtenidos en el comportamiento espacial de los metales en sedimentos en este estudio, con la excepción de Fe, éstos se hallan relacionados con la afectación antropogénica más que a cualquier otra fuente.

En México no existe una legislación en cuanto a las Normas Oficiales que señalen los límites permisibles respecto a los metales pesados en sedimento (Curtidor, 1999), por lo que no es posible tener un punto de referencia dentro de un marco legal, como sucede con las concentraciones de metales en agua.

Los valores encontrados para sedimento para ambos análisis (espacial y tempora) se encuentran dentro del rango para áreas no contaminadas (Anderlini, et al, 1982 En: Carbonel et al., 1998), con excepción del Cd, cuyos valores están por encima de los valores considerados para áreas no contaminadas (Tabla 8.2.1.). Estos resultados concuerdan con lo reportado por Alvarez y Sáenz (1998) y Alvarez, et al, (2000), (Tabla 8.2.2.), sin embargo a diferencia de Alvarez et al. (2000) quienes no reportan ni Pb, ni Cu, para los mismos sitios, en una de las

fechas de muestreo, en este estudio sí se reportan dichos metales, esto podría deberse a diferencias en los procedimientos de muestreo, en la preparación de la muestra y a los errores asociados con el método de análisis, (Villanueva y Páez-Osuna, 1996).

Tabla 8.2.1. Niveles de metales pesados en sedimentos de áreas no contaminadas (Anderlini, et al, 1982 En: Carbonel et al, 1998)

| | Cd | Cu | Fe | Pb | Zn |
|-------------------|---------|-------|--------------|-------|--------|
| µg/g base seca | 0.1 – 3 | 19-78 | 7,000-60,000 | 12-95 | 24-114 |

A pesar de lo anterior, la tendencia de los metales encontrada por Alvarez et al. (2000), de que el Fe y Zn se encontraran en mayor concentración, se mantiene en ambos casos.

Comparando las concentraciones detectadas en este estudio con los de Pérez (1999) (Tabla 8.2.2.), se observó que las concentraciones promedio de Cd, Cu, Pb y Zn, resultan superiores en magnitud, no así los de Fe, que fueron inferiores, tales diferencias podrían deberse a que los sitios de estudio de Pérez (2000), fueron más cercanos a la línea de costa que este estudio y que la mayoría de sus estaciones de muestreo se localizaron en la zona adyacente a la Ciudad de Chetumal, lo que probablemente influyó en los resultados. Así mismo, se podría atribuir las variaciones encontradas a las mismas fuentes potenciales de error ya mencionadas.

De las concentraciones encontradas en sedimento para ambas variaciones, solamente el Cd fue superior al rango de efectos bajos, ERL, establecido por Long et al. (1995), para dicho metal (Tabla 8.1.3.), lo que nos indica que los organismos que habitan en el área de estudio, están expuestos a efectos adversos, con una probabilidad del 36.6% de sufrirlos. Sin embargo, hay que considerar que en únicamente se han tomado en cuenta los valores totales de los metales, García-Ríos y Gold-Bouchot (2002), en un estudio sobre metales en la Bahía, encontraron que las mayores concentraciones de metales se hallan incorporados

a las estructuras minerales de los sedimentos (del 79 al 99%), por lo que se hallan poco biodisponibles a los organismos. Para el Cd del 85 al 90.32 % se halla incorporado a dichas estructuras, por lo que a pesar de las altas concentraciones encontradas, menos del 10 % está a biodisponible para los organismos.

Tabla 8.2.3. Niveles de metales pesados en sedimentos en la Bahía de Chetumal. (valores en $\mu\text{g/g}$ base seca). Se incluye los resultados de las concentraciones determinadas por Long et al. (1995) que presentan efectos sobre los sistemas biológicos.

| Fuente | Cd | Cu | Fe | Pb | Zn |
|-----------------------------------|--------------|---------------|------------------|---------------|--------------|
| Pérez (1999) | 3.64 | 14.67 | 112.97 | 11.60 | 17.48 |
| Alvarez y Sáenz (1998) | 3.76 (0.87) | 77.22 (19.79) | -- | 41.42 (22.72) | 9.96 (3.15) |
| Alvarez, et al, (2000)* | 5 | N. D. | 2256.36 | N. D. | 61 |
| García-Ríos y Gold-Bouchot (2002) | 1.50 | 4.79 | 846.80 | 23.45 | 5.87 |
| ERL Long et al. (1995) | 1.2 | 34.0 | N. A. | 46.7 | 150.0 |
| ERM Long et al. (1995) | 9.6 | 270.0 | N. A. | 218.0 | 410.0 |
| Este estudio, var. Temporal | 1.37 (1.724) | 1.31 (1.533) | 549.72 (340.122) | 1.94 (2.721) | 5.84 (5.106) |
| Este estudio, var. Espacial | 1.58 (1.853) | 1.65 (0.515) | 591.53 (312.122) | 2.69 (3.372) | 3.96 (2.552) |

*Valores máximos encontrados, los datos de las concentraciones promedio no se encontraron disponibles.

N.A. No Analizado N. D. No Detectado

8.3. MACROALGAS

8.3.1. *Batophora* spp.

8.3.1.1. *Variación temporal.*

Por el comportamiento temporal que presentó el Cd, se le podría relacionar con las concentraciones encontradas con el agua y sedimento, ya que se correlacionó significativamente con ellas, positivamente en el primer caso y

negativamente con el segundo, por lo que esta alga aparentemente esta reflejando las condiciones imperantes en agua y sedimento.

El Cu, se mantuvo estable a través de los meses. Dicho comportamiento se ha observado anteriormente en el alga *Enteromorpha* spp. (Leal et al. 1997, Rijstenbil et al, (1998). A pesar de su estabilidad, presentó una correlación significativa con las concentraciones en sedimento, por lo que su comportamiento temporal al parecer se relacionaría con las concentraciones que se encontraron en él.

El Fe, presentó un comportamiento distinto para cada sitio. Dado que el Fe, no es considerado en su toxicidad como los otros metales aquí analizados, es difícil encontrar estudios que involucren una evaluación temporal del Fe en algas verdes, por lo que no se tiene un antecedente del comportamiento del Fe, en algas verdes.

Considerado el comportamiento temporal presentado por el Fe, podríamos relacionarlo a lo que ocurre en el sedimento y el agua con este metal, es decir que el Fe es tomado por el alga de acuerdo a las condiciones del sistema en el sitio de colecta, sin estar necesariamente influenciado por las concentraciones del metal existentes en el agua, pero sí con el sedimento, con el cual mostró una correlación significativa positiva, lo que explicaría la variación temporal diferente entre los dos sitios.

El Pb, presentó un comportamiento similar en ambos sitios en el sentido de su comportamiento temporal fue variable, dado que no presentó correlación con la concentración de metales en agua o sedimento, dicho comportamiento estaría más relacionado con los mecanismos de captación de la planta que a las fluctuaciones temporales en su medio.

El Zn, presentó un comportamiento similar en ambos sitios, no obstante difirió respecto a la magnitud de las concentraciones. Aunque no presentó correlación con las concentraciones de Zn en agua o sedimento, el que presentara concentraciones más altas en el sitio 1 que en el 3 concuerda con lo que reflejó en su comportamiento temporal en el agua, es decir, que sí es influenciado por las fuentes de introducción al sistema, en este caso las antropogénicas, y la variación

temporal que presentó nos parece confirmar que sí se realiza un fenómeno de enriquecimiento y sedimentación de este metal.

8.3.1.2. *Variación espacial.*

Para el Cd, a diferencia de lo esperado, las concentraciones más altas se encontraron en la temporada de secas, espacialmente. Dado que se encontró una correlación significativa negativa con el sedimento, el comportamiento espacial que presenta el Cd, podría estar relacionado a lo que ocurre en el sedimento, variando de acuerdo a las concentraciones que en el se encuentren.

Al igual que el Cd, el Cu, Fe, y Zn, presentaron correlación con el sedimento, sin embargo esta fue positiva, por lo que su variación espacial se asociaría al comportamiento con el sedimento y por ende con sus fuentes de introducción al sistema.

En el caso del Pb, podría suceder lo mismo que con la variación temporal, es decir que estaría más relacionado con los mecanismos de captación de la planta que con las concentraciones de Pb en el agua y el sedimento.

Un aspecto que no se observó en los datos de la variación temporal, pero sí en los de la variación espacial, es la marcada diferencia entre la magnitud y aparición del Pb en algunos sitios en ambos meses, lo que podría significar que sí exhibe temporalidad.

Esta alga ha sido analizada por Rojas (1997) y Alvarez et al, (2000), lo que nos permite comparación de resultados.

Como se puede observar en la Tabla 8.3.1, las concentraciones de metales en *Bathopora* spp., analizadas temporal y espacialmente, difirieron con las reportadas por Rojas (1997) y Alvarez, et al, (2000), el Cu, Fe, y Pb, probablemente debido a diferencias entre los sitios de muestreo, temporada y fuentes potenciales de error de un autor a otro. Las concentraciones reportadas para ambas variaciones fueron inferiores a las reportadas por Alvarez (2000) y

similares para el Cd, superiores en el caso del Cu e inferiores para el Fe, Pb y Zn que las de Rojas (1997).

En cuanto a las concentraciones que halló Rojas (1997), los valores que reporta son bajos en comparación de valores reportados para Puerto Morelos, Quintana Roo, y La Parguera, Puerto Rico (Duarte et al, 1995 y Stevenson & Lugo, 1966 En: Rojas 1997), atribuyendo las bajas concentraciones que encontró a la interferencia del carbonato de calcio existente en la Bahía de Chetumal, el cual interfiere con la absorción de algunos elementos como el Fe.

Alvarez, et al, (2000), al respecto menciona que las concentraciones de metales, en los organismos que estudió, entre ellos la *Batophora* spp., con la excepción del Cd, se encuentran dentro de los considerados no contaminados.

Tabla 8.3.1. Niveles de metales ($\mu\text{g/g}$) en *Bathopora* spp. en la Bahía de Chetumal. Los valores en los paréntesis corresponden a la desviación estándar

| Fuente | Cd | Cu | Fe | Pb | Zn |
|------------------------------|-----------------|-----------------|----------------------|-----------------|-----------------|
| Rojas, 1997 | 1.7 | 0.7 | 209 | 18 | 5 |
| Alvarez, et al, 2000.* | <3.5 | N. D. | 1417.42 | N. D. | 49.38 |
| Este estudio, var. temporal | 1.84 (1.853) | 1.83 (0.804) | 1013.28 (540.094) | 3.56 (3.662) | 3.62 (3.115) |
| Este estudio, var. espacial. | 1.58 (2.003) | 1.30 (1.102) | 542.61 (433.269) | 3.53 (3.244) | 3.21 (4.305) |

*Valores máximos detectados para cada metal.

8.3.2. *Bostrychia* spp.

Esta alga a diferencia de la *Batophora* spp. no había sido objeto de estudio para analizar la concentración de metales, sus características fisiológicas la diferencian marcadamente con la *Batophora* spp.

8.3.2.1. *Variación temporal.*

Cada metal presentó un comportamiento temporal diferente, sin embargo coinciden, con la excepción del Zn, en mostrar patrones similares en ambos sitios, lo que nos sugiere mecanismos de regulación en la introducción de los metales a su sistema. Particular atención causa el hecho que no se detectara plomo, con la única excepción en el mes de octubre, mes de lluvias, en el sitio 3, dicha aparición podría estar relacionada a la temporada de lluvias que causó impacto en las concentraciones de agua, y a la mención anterior de que fue en el sitio 3 se encontró una mayor cantidad de basura enredada en esta alga.

Considerando lo anterior podría contemplarse la posibilidad de la existencia de un mecanismo de resistencia al Pb en la *Bostrychia* spp. Uno de los mecanismos de resistencia al Pb conocido es la destoxificación interna por la acumulación del Pb en el núcleo celular (Silverberg et al, 1976 En: Devars et al, 1999), sin embargo también podría deberse a algún factor fisicoquímico que haya influido en la captación del metal, entre ellos la temperatura, el pH, presencia de cationes monovalentes y divalentes, aniones, productos extracelulares, sólidos suspendidos y en algunos casos la presencia de otro metal pesado que inhiba su introducción (Devars et al, 1999). Sea cual fuere el caso, se necesitaría un estudio específico para poder explicar el comportamiento presentado por el Pb.

El Cd, fue el único metal que presentó una correlación significativa con el sedimento, aunque esta fue negativa, así mismo fue el metal que presentó una mayor similitud en su comportamiento temporal en ambos sitios, esto probablemente debido a que el Cd presentó dicha similitud en sus concentraciones en el sedimento.

8.3.2.2. *Variación espacial.*

Cada metal presentó un comportamiento espacial diferente, el Pb, no se detectó con la excepción del mes de octubre en el sitio 3, las causas de esta aparición fueron comentadas anteriormente. A diferencia de la *Batophora* spp. no

se encontró ninguna correlación con las concentraciones de metales en agua o sedimento, lo que nos sugiere que los valores detectados se relacionan principalmente con los mecanismos de acumulación del alga y probablemente a factores fisicoquímicos que imperan en los sitios.

Lo anterior parece coincidir con el comportamiento del Cd, Cu, y Zn, que presentaron un comportamiento espacial que no se asocia con las fuentes de metales en sedimentos o agua.

El Cd, presentó su más alta concentración en el sitio 5 en la temporada de lluvias, y en el sitio 3 en la temporada de secas (febrero); el Cu, presentó su valor más alto en los sitios 1 y 2 en octubre y en el sitio 4 en febrero; el Zn, lo hizo en el sitio 4 en octubre y en el sitio 5 en febrero, por lo que es difícil asociarlos a una fuente en específico.

No obstante lo anterior, fue posible observar que la temporada sí influye en su distribución espacial, pero no como en el agua o sedimento, en los que las concentraciones mayores se registraban en la temporada de lluvias, lo cual no sucede en este caso, ya que las concentraciones más altas se registraron en temporada de secas.

En el caso del Fe, en ambos meses, las concentraciones más altas se registraron en el sitio 1, en ambos meses, así mismo se presenta otro pico en el sitio 3 (las diferencias entre ambos sitios fueron significativas), lo que refuerza la idea del hecho de que *Bostrychia* spp. es particularmente impactada por este metal.

El comportamiento espacial del Fe, a diferencia de los otros metales parece relacionarse principalmente con el aporte antropogénico. El hecho de que no se correlacione con las concentraciones detectadas en el agua o sedimento, quizá deba a que el Fe presentó en ambos casos un comportamiento muy variable, probablemente debido a sus características fisicoquímicas.

Los resultados obtenidos en ambas algas nos hablan de mecanismos de acumulación diferentes para cada alga así como una afectación diferente a las concentraciones existentes en agua y sedimento.

Bathopora spp. refleja en mayor medida que *Bostrychia* spp las concentraciones existentes en agua y sedimento, principalmente en su distribución espacial, lo que para *Bostrychia* spp. sólo sucedió con el Cd, en la distribución temporal.

Únicamente el Fe para *Bostrychias* spp. refleja una afectación directa de una fuente en específico, a pesar de su variación en su comportamiento temporal y espacial, lo que dificultó su vincularlo a una fuente en particular.

En cuanto a las tendencias encontradas, ambas macroalgas sitúan en primer lugar al Fe y en segundo al Zn, lo que coincide con resultados obtenidos en otras algas, con la *Enteromorpha* spp., *Ulva* spp. (Fytianos, et al, 1999) y con la briofita *Scapania undulata* (Vincent, et al, 2000).

El que *Bostrychia* spp. sitúe en tercer lugar al Cd y que *Bathopora* spp. sitúe al Pb, ambos metales no esenciales para las algas, parece indicar que cada alga ha reaccionado diferente a la afectación de estos metales; el Cd, fue el único metal que constituye una amenaza a los organismos, por las concentraciones encontradas en el sedimento, y el Pb, asimismo fue el metal que destacó por sus altas concentraciones en el agua, sobrepasando en magnitud a los otros metales aquí estudiados.

8.4. FACTOR DE BIOCONCENTRACIÓN

Los Factores de Bioconcentración (FBC) variaron entre ambas especies, siendo *Batophora* spp. la que tuvo mayores valores; *Bostrychia* spp., por el contrario no presentó bioconcentración de Cu y Pb.

Comparando los resultados obtenidos en ambas especies en este estudio con valores encontrados en *Enteromorpha* spp., *Porphyra* spp., y en macrofitas marinas y de agua dulce, se observa que con la excepción de Fe para *Batophora* spp., resultan inferiores. (Tabla 8.4.1.). Dado a que no existen antecedentes de FBC reportados para las especies de macroalgas aquí estudiadas, se dificulta establecer si los valores encontrados son reflejo de las características fisiológicas de cada macroalga o del estado en que se encuentran con respecto al sistema.

Aunque en la tabla 8.4.1. se observan valores que comprenden el promedio de los FBC encontrados en las variaciones estacionales y temporales, es importante considerar de dichos valores debe ser tomado con precaución; los FBC deber ser relativamente constantes en el área de estudio, así la especie elegida como biomonitor puede ser utilizada para estimar los niveles de contaminación por metales en otros sitios dentro del área, o en los mismos sitios en los años siguientes (Leal et al, 1997).

En nuestro caso, los valores varían entre sitios, especialmente con *Bathopora* spp. Contrario a lo que pudiera esperarse por los bajos valores encontrados, *Bostrychia* spp., presenta una menor variabilidad, especialmente en el caso del Cd, ya que los valores encontrados presentan menor variación.

Si consideramos que la consistencia en los resultados obtenidos del cálculo del FBC, es la que indica que especie funcionaría como mejor biomonitor, y con las condiciones presentes al momento de hacer este estudio, únicamente *Bostrychia* spp. pudiera ser utilizada para estimar el contenido de Cd en agua.

No obstante lo anterior, se tiene que considerar que para dicho cálculo se utilizaron los valores encontrados en el agua, y que son las fracciones biodisponibles en los sedimentos los que representan el riesgo en los organismos, ya que influyen en su bioconcentración o bioacumulación, dependiendo de

factores como las concentraciones totales en el sedimento, su tipo y el contenido de materia orgánica en él (Curtidor, 1999).

Considerando lo mencionado, se considera la posibilidad de la influencia de la biodisponibilidad de los metales analizados en los valores de FBC encontrados, ya que como se menciona anteriormente, en la Bahía de Chetumal ésta ha sido reportada para esta zona como del 1 al 21% (García-Ríos y Gold-Bouchot, 2002).

Tabla 8.4.1. Factores de bioconcentración en varias algas. FBC = concentración del metal en el alga ($\mu\text{g/g}$ base seca)/concentración del metal en el agua ($\mu\text{g/ml}$)

| Alga | Cd | Cu | Fe | Pb | Zn | Fuente |
|--------------------------|-------|-------|--------|-------|-------|---------------------------|
| Macrofitas marinas | -- | 2,890 | -- | -- | 7,000 | Williams (1976) cit por ? |
| Macrofitas de agua dulce | -- | 158 | 3,642 | -- | 318 | Williams (1976) cit por ? |
| <i>Enteromorpha sp.</i> | 7,500 | 6,000 | -- | 1,900 | -- | Leal et al. (1997) |
| <i>Porphyra sp.</i> | 6,200 | 5,200 | -- | 920 | -- | Leal et al. (1997) |
| <i>Enteromorpha sp.</i> | 4,840 | 1,700 | 15,000 | 5,300 | 3,600 | Fytianos, et al. (1999) |
| <i>Ulva sp.</i> | 2,700 | 900 | 9,000 | 1,600 | 2,600 | Fytianos, et al. (1999) |
| <i>Batophora spp.</i> | 131 | 39 | 39,587 | 81 | 417 | Este estudio |
| <i>Bostrychia spp.</i> | 6 | 0 | 439 | 0 | 8 | Este estudio |

9. CONCLUSIONES

- El análisis temporal en cada uno de los compartimentos no mostró un patrón colectivo determinado, pero sí cierta tendencia hacia la temporada de lluvias, especialmente con el agua y con el Fe y Pb.
- El análisis espacial, tampoco demostró un patrón específico general, pero sí refleja como impacto principal el antropogénico, ya sea por la cercanía a zonas urbanas y/o recreativas, o por el aporte proveniente de las zonas de cultivo.
- Se pudo observar una correlación positiva (en general) con las concentraciones halladas en sedimento y el alga *Batophora* spp., no así con *Bostrychia* spp, la cual se asocia principalmente a sus mecanismos de acumulación.
- Respecto a las concentraciones encontradas en cada comportamiento, el Cd presentó valores correspondientes a zonas contaminadas, sin embargo dada la biodisponibilidad de este metal en este sistema, se sugiere tomar con precaución los resultados obtenidos.
- El plomo únicamente presentó valores altos para el agua, sin embargo dadas sus características químicas tampoco representa una amenaza inmediata, pero sí un factor a tomar en cuenta.
- Las diferencias encontradas en los patrones de las concentraciones de ambas algas, indica diferentes respuestas de éstas a la afectación de dichos metales.
- No se encontró una relación clara entre los FBC encontrados y la variación espacio-temporal, no obstante sí se pudo observar que *Batophora* spp. acumula en mayor medida (valores y metales reportados) que *Bostrychia* spp.
- Dados los resultados obtenidos, únicamente ésta última podría ser considerada como bioindicadora, pero sólo de Cd.

10. LITERATURA CITADA

- Álvarez-Legorreta, T. y Sáenz-Morales, R. 1998. Plaguicidas organoclorados, hidrocarburos y metales pesados en sedimentos de la Bahía de Chetumal. Informe Técnico. SEMARNAP-ECOSUR. 10 p.
- Álvarez-Legorreta, T., Medina-Martín, D. Y Zavala-Mendoza, A. 2000. Plaguicidas organoclorados y metales pesados en sedimentos y organismos bénticos de la Bahía de Chetumal. *En* SEMARNAP-ECOSUR. Bioindicadores Bénticos de la Bahía de Chetumal. Informe Final. México.
- APHA-AWWA-WPCF. 1992. Métodos normalizados para el análisis de agua potable y residuales. Ediciones Díaz de Santos: España. Pp. 1-40.
- Cano, G. y R. Flores. 1989. Estudio del efecto que causan descargas de aguas negras y el drenaje fluvial sobre la vida bacteriana, planctónica y en las variaciones de algunos parámetros fisicoquímicos en la zona colindante de la zona de Chetumal con su Bahía. Secretaría de Marina, México. Informe técnico. 23 p.
- Cano, G. y R. Flores. 1990. Determinación y análisis de parámetros fisicoquímicos, así como algunos aspectos de contaminación en la Bahía de Chetumal, Quintana Roo. Segunda fase. Oficina Coordinadora de Programas contra la Contaminación del Mar. 11ª Zona Naval. Armada de México. 23 p.
- Carrera-Parra, L. y González, N. 1997. Bentos en el litoral de la Bahía de Chetumal, Q. Roo. *En*: ECOSUR. Estudio emergente sobre la Mortandad de bagres en la Bahía de Chetumal, Reporte final. México. 84 p.
- Chavira-Martínez, D., Briceño-González, J., Negroe, A., Pérez-Cetina, J., Sánchez, T. y Hoil, R. 1992. Diagnóstico de la calidad del agua en la bahía de Chetumal, Q. Roo. *Avacient* 3:16-31.

- Contreras, F. 1985. Las lagunas costeras mexicanas. Centro de Ecodesarrollo/Secretaría de Pesca, México, D.F. 263 p.
- Darley, M. W. 1987. Biología de la algas. Enfoque fisiológico. Editorial Limusa: México. Pp. 208-213.
- Devars, S., González–Moreno, S., Cañizares–Villanueva, O, Sosa–Luna, L. y Moreno–Sánchez, R. 1999. Tolerancia a los Metales Pesados en Algas. *En: Moreno–Sánchez, R. y Cervantes, C. (eds.) Contaminación Ambiental por Metales Pesados. Impacto en los Seres Vivos. A. G. T. Editor. México. D. F. 157 p*
- ECOSUR. 1997. Estudio emergente sobre la Mortandad de bagres en la Bahía de Chetumal, Reporte final. México. 84 pp.
- Eriksen, K.D.H., Andersen, T. y J.S. Gray. 1989. Metal-Binding in Polychaetes: Quantitative and Qualitative Studies of Five Species. *Marine Environmental Research* 28: 167-171.
- Fytianos, K., Eugenidou, E., y Zachariadis G. 1999. Use of Macroalgae as Biological Indicators of Heavy Metal Pollution in Thermaikos Gulf, Greece. *Environmental Contamination and Toxicology*. 62:630-637.
- García–Ríos, V. y Gold–Bouchot, G. 2002. Especiación de Metales Pesados en la Bahía de Chetumal, Q. Roo y la Acumulación en el Tejido Muscular de Bagres (*Arius assimilis*). *En: F. J. Rosado–May, R. Romero–Mayo y A. De Jesús–Navarrete (Eds.) Contribuciones de la ciencia al Manejo Costero Integrado de la Bahía de Chetumal y su Área de Influencia. Universidad de Quintana Roo. Chetumal, Q. Roo. México. p. 143-148.*
- Gasca, R., e I. Castellanos. 1993. Zooplancton de la Bahía de Chetumal, Mar Caribe, México. *Rev. Biol. Trop.* 41 (3): 291-297.

- Gledhill, M., Nimmo, M., Hill, S. T. y Brown, M. T. 1997. The toxicity of Copper II species to marine algae, with particular reference to macroalgae. *J. Phycol.* 32:2-11.
- Gobierno del Estado de Quintana Roo, 1997. Se declara como ÁREA NATURAL PROTEGIDA LA REGIÓN CONOCIDA COMO BAHÍA DE CHETUMAL, CON LA CATEGORÍA DE ZONA SUJETA A CONSERVACIÓN ECOLÓGICA, SANTUARIO DEL MANATÍ, UBICADA EN EL MUNICIPIO DE O. P. B. Periódico Oficial del Gobierno del Estado de Quintana Roo, 24 de octubre.
- Goldberg, D. E. 1975. The mussel watch a first step of on global marine monitoring. *Mar. Poll. Bull.* 6: 111.
- Gómez–Poot, J. M. 2000. Características vegetativas y reproductivas de dos especies de *Batophora* (Chlorophyta: Dasycladaceae) en la Bahía de Chetumal, Q. Roo, México. Tesis de Maestría en Ciencias. ECOSUR. 25 p.
- González–Escalante, L. E. y Salazar–Vallejo, S. I. 2000. Evaluación de los poliquetos nereidos como biondicadores en la Bahía de Chetumal, Q. Roo. Informe Final de Biondicadores Bénticos de la Bahía de Chetumal. SEMARNAP–ECOSUR. 109 p.
- Guilizzoni, P. 1991. The role of heavy metals and toxic materials in the physiological ecology of submersed macrophytes. *Aquatic Botany*, 41:87-109.
- Hillson, C. J. 1977. Seaweeds. A color coded, ilustrated guide to common marine plants of the east Coast of the United Sates. Keystone Books: USA. 54 p.
- Huerta, M. L. y Garza-Barrientos, A. M. 1980. Contribución al Conocimiento de la Flora Marina de la Zona Sur del Litoral de Quintana Roo, México. *Anal. Esc. Nal. de Cien. Biol.* México. 23:25-44.

- Jiménez–Flores, S. G. 2000. Aspectos Ecológicos de *Batophora spp.* en la Bahía de Chetumal, Q. Roo. Memoria de Residencia Profesional para la Licenciatura en Biología. Instituto Tecnológico de Chetumal. 61 p.
- Leal, F., Vasconcelos T., Sousa-Pinto, I. y Cabral J. 1997. Biomonitoring with Benthic Macroalgae and Direct Assay of Heavy Metals in Seawater of the Oporto Coast (Northwest Portugal). *Marine Pollution Bulletin*. 34(12):1006-1015.
- Llanes–Baeza, C. y Salazar–Vallejo, S. I. 2000. Evaluación de los mejillones *Mytilopsis sallei* y *Brachidontes exustus* como Biondicadores de la Bahía de Chetumal, Q. Roo. P. 28-51. Informe Técnico de Biondicadores Bénticos de la Bahía de Chetumal. SEMARNAP–ECOSUR.
- Llanes–Baeza, C. 2002. Variación espacial y temporal de los mejillones *Mytilopsis sallei* (Recluz, 1849) y *Brachidontes exustus* (Linné, 1758) y su utilidad como indicadores de contaminación orgánica en la Bahía de Chetumal, Quintana Roo. Tesis de Licenciatura. ITCh. 78 pp
- Long, E. R., MacDonald, D. D. Smith, S. L. y Calder, F. E., 1995. Evidence of adverse biological effectsd within ranges of chemical concentration in marine and estuarine sediments. *Marine Pollution Bulletin*. 14:65-68.
- McComrmick P. V. y Cairns, J. 1994. Algae as indicators of environmental change. *Journal of Applied Phycology* 6: 509-526.
- Moreno–Sánchez, R. y Devars, S. 1999. Abundancia de Metales Pesados en la Biosfera. *En: Moreno–Sánchez, R. y Cervantes, C. (eds.) Contaminación Ambiental por Metales Pesados. Impacto en los Seres Vivos.* A. G. T. Editor. México. D. F. 157 p.
- Moreno–Sánchez, R., Díaz–Barriga, F. y Devars, S. 1999. Mecanismos de Toxicidad y de Tolerancia a los Metales Pesados. *En: Moreno–Sánchez, R.*

y Cervantes, C. (eds.) Contaminación Ambiental por Metales Pesados. Impacto en los Seres Vivos. A. G. T. Editor. México. D. F. 157 p.

Morrison, D. 1984. Seasonality of *Batophora oerstedii* (Chlorophyta), a tropical macroalga. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 14:253-244.

Murphy L. S. y R. A. Belastock , 1980. The effect of environmental origin of response of marine diatoms to chemical stress. *Limnol. Oceanogr.* 25, 160-5.

Noreña-Barroso, E., Zapata Pérez, O., Ceja-Moreno, V., y Gold-Bouchot, G. 1998. Hydrocarbon and Organochlorine Residue Concentrations in Sediments from Bay of Chetumal, México. *Environmental Contamination and Toxicology*, 61(1):81-87.

Nriagu, J. O. y Coker, R. D. 1980. Trace metals in humic and fulvic acids from Lake Ontario Sediments. *Environ. Sci. Technol.* 14:443-446.

Ortiz, M., y Sáenz, R. 1995. Monitoreo de la contaminación de la Bahía de Chetumal. Quintana Roo. Informe Final, Proyecto CONACyT No. 1040-N9111. Centro de Investigaciones de Quintana Roo. Chetumal, 50 pp.

Ortiz, M., y Sáenz, R. 1996. Detergentes domésticos como factor contaminante en la zona urbana de la Bahía de Chetumal, Q. Roo, México. *Avicennia* 4/5:67-67.

Ortiz, M., y Sáenz, R. 1999. Effects of organic material and distribution of fecal coliforms in Chetumal Bay, Q. Roo, México. *Environmental Monitoring and Assessment* 55:423-434.

Paéz-Osuna, F. 1996. Efectos de los metales. *In:* Botello, A. V., Rojas-Galaviz, J. L., Benítez, J. A. y Zárata-Lomelí, D. (eds.) Golfo de México. Contaminación e Impacto Ambiental. Diagnóstico y Tendencias. Universidad Autónoma de Campeche, México. *EPOMEX*. Serie Científica, vol. 5. 666 p.

- Paéz-Osuna, F. 1996. Fuentes de Metales en la Zona Costera Marina. *In*: Botello, A. V., Rojas-Galaviz, J. L., Benítez, J. A. y Zárate-Lomelí, D. (eds.) Golfo de México. Contaminación e Impacto Ambiental. Diagnóstico y Tendencias. Universidad Autónoma de Campeche, México. *EPOMEX*. Serie Científica, vol. 5. 666 p
- Pérez, G. R. 1999. Estudio y análisis de la polución marina en la bahía de Chetumal, por medio de la evaluación de técnicas para la determinación de ortofosfatos. Tesis de Licenciatura. Universidad de Quintana Roo. 146 p.
- Perkin Elmer, 1994. Analytical Methods for Atomic Absorption Spectrometry. Pp. 141-1463, 184.
- Phillips, D. 197. The use of biological indicator organism to monitor trace metal pollution in marine and estuarine environments- a review. *Environ. Pollut.* 13:281-317.
- Quan-Young, L. I., Jiménez-Flores, S. G. y Espinosa-Ávalos, J. 2000. Flora Béntica y Contaminación en la Bahía de Chetumal. Informe Técnico de Biondicadores Bénticos de la Bahía de Chetumal, Q. Roo. SEMARNAP-ECOSUR.
- Rai, P. K., Pradhan, S. y Rai, L. C. 1998. Algal Responses to Heavy Metals with Special Reference to Mechanism of Toxicity and Tolerance. *In*: Verma, B. N., Kargupta, A. M. & Goyal, S. K. (ed.) Advances in Phycology. APC. Publications. Pvt. Ltd. New Delhi, 1998. Pp. 251-280.
- Rijstenbil, J. W., Haritonidis, S., Malea, P., Seferlis, M. y Wijnholds, J. A. 1998. Thiol pools and glutathione redox ratios as possible indicators of copper toxicity in the green macroalgae *Enteromorpha spp.* from the Schelt Estuary (SW Netherlands, Belgium) and Thermaikos Gulf (Greece, N Aegean Sea). *Hydrobiologia*. 385:171-181.

- Rojas, A. M. 1997. Concentración de metales en hueso y sangre del *manatí* (*Trichechus manatus manatus*), en la Bahía de Chetumal, Q. Roo, México. Tesis de maestría. ECOSUR, Chetumal, 8 p.
- Rubio, B., Nombela M. A. y Vilas, F. 2000. Geochemistry of Major and Trace Elements in Sediments of the Ria de Vigo (NW Spain): an Assessment of Metal Pollution. *Marine Pollution Bulletin*. 40(11):968-980.
- Salazar-Vallejo, S. 1991. Contaminación Marina. Centro de Investigaciones de Quintana Roo. Fondo de Publicaciones y Ediciones. Gobierno de Quintana Roo, México.
- Salazar-Vallejo, S., Zurita, J. C. y González N. E. 1993. Areas Costeras Protegidas de Quintana Roo. *En: Biodiversidad Marina y Costera de México*, 865 p.
- Santillán, G. y Negrete, G. 1987. Colecta y determinación de plancton en la Bahía de Chetumal, durante el período Verano-Otoño 1987. Reporte de Servicio. UNAM. 69 p.
- SEMARNAP. 1996. Contaminación química en la Bahía de Chetumal. Boletín Caribe. Delegación Quintana Roo. México. 10 pp.
- Suárez, E., Gasca, R., Vásquez-Yeomans, L., Hernández, R. M., González, A. y Castellanos, I. 1991. Fauna Planctónica, p. 92-116. *En: T. Camarena-Luhrs y Salazar-Vallejo, S. (eds.). Estudios Ecológicos preliminares de la zona sur de Quintana Roo. Centro de Investigaciones de Q. Roo, México.*
- Suárez, E. 1994. Copépodos pláncnicos de la Bahía de Chetumal; México (1990-1991). *Caribbean Journal of Science*. 30(3-4):181-188.
- Phillips, D. 1977. The use of biological indicator organism to monitor trace metal pollution in marine and estuarine environments- a review. *Environmental Pollution*. 13: 281-317.

- Taylor, R. 1960. Marine Alga of Eastern Tropical and Subtropical Coast. University of Michigan Press: USA. Scientific Series XXI. 870 p.
- Turner, A. 1994. The Response of Plants of Heavy Metals. *In*: Ross, S. (ed.) Toxic Metals in Soil-Plants Systems. Jhon Wiley & Sons Ltd.: Englad. 469 p.
- Vega, S. y J. Reynaga. 1990. Evaluación epidemiológica de riesgos ambientales causados por agentes químicos ambientales. Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud. Organización Panamericana de la Salud. OMS. Editorial Noriega: México.
- Villanueva, F. S. y Botello, A. V. 1998. Metal Pollution in Coastal Areas of Mexico. *Rev. Environ. Contam. Toxicol.* 157:53-94.
- Villanueva, F. S. y Páez-Osuna, F. 1996. Niveles de metales en el Golfo de México: agua, sedimento y organismos. *In*: Botello, A. V., Rojas-Galaviz, J. L., Benítez, J. A. y Zárata-Lomelí, D. (eds.) Golfo de México. Contaminación e Impacto Ambiental. Diagnóstico y Tendencias. Universidad Autónoma de Campeche, México. *EPOMEX*. Serie Científica, vol. 5. 666 p.
- Villanueva, S. y Botello, A. V. 1992. Metales pesados en la zona costera del Golfo de México y Caribe mexicano: una revisión. *Rev. Int. Contam. Ambient.*, 8(1):47-51.