

# UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA

## FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS

---



### **BIODISPONIBILIDAD DE METALES Y SU RELACION CON LA TALLA DEL MEJILLON *Modiolus sp.* EN LAS COSTAS DE BAJA CALIFORNIA**



**T E S I S**  
que para obtener el titulo de  
**O C E A N O L O G O**  
p r e s e n t a  
**ANABEL ARREOLA CHIMAL**

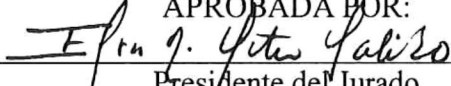
UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA  
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS

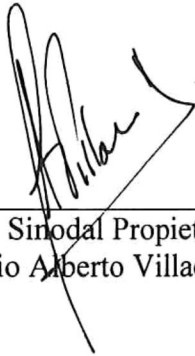
BIODISPONIBILIDAD DE METALES Y SU RELACION CON LA  
TALLA DEL MEJILLON *Modiolus sp.* EN LAS COSTAS DE BAJA  
CALIFORNIA

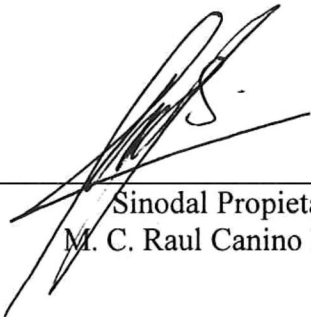
Tesis que para obtener el grado de Oceanólogo  
Presenta

**ANABEL ARREOLA CHIMAL**

APROBADA POR:

  
\_\_\_\_\_  
Presidente del Jurado  
Dr. Efrain Abrahan Gutierrez Galindo

  
\_\_\_\_\_  
Sinodal Propietario  
M.C. Julio Alberto Villaescusa Celaya

  
\_\_\_\_\_  
Sinodal Propietario  
M. C. Raul Canino Herrera

Ensenada, B. C., junio de 1999.

## RESUMEN

En este estudio se evalúa las concentraciones y variaciones de los metales pesados Cu, Mn, Zn, Al, Cd, Ag, As y Se entre diferentes clases de tallas de mejillón *Modiolus capax*, residente en Punta Estrella, Bahía de Los Angeles y Santa Rosalía en el Mar de Cortes y de *Modiolus modiolus* y *Mytilus californianus* en la localidad de Bahía Tortugas en el Pacífico. Para este propósito se colectó durante noviembre de 1988, mejillones de estas especies y se realizó una selección de 45 organismos midiendo variables biométricas en talla grande (88-98 mm), talla mediana (70-87 mm) y talla chica (56-66 mm). La cuantificación de los metales se realizó por absorción atómica con llama aire-acetileno para Zn, Cu, Cd y Mn, con llama aire-óxido nitroso para Al y con horno de grafito para Ag. El As y Se, fueron cuantificados por generación de hidruros. Por cada grupo de 15 muestras se analizaron estándares de referencia y blancos de procedimiento. Los resultados indican que la distribución geográfica y la acumulación de metales en las diferentes tallas se encuentran influenciadas por las fuentes de aporte, la biodisponibilidad en cada lugar y la condición biológica de los organismos. Los mejillones presentaron niveles de Cu independientes de la talla en la región, excepto en Santa Rosalía. El Zn, Cd y Se indican una fuerte variabilidad regional y no mostraron una tendencia clara con respecto a la talla de los organismos. El Al mostró una alta variabilidad regional con una tendencia a acumularse en organismos de talla chica. El As y Se se concentran mayormente en mejillones de talla grande-mediana, independiente de la localidad de colecta. El Mn, tiende acumularse en tallas grande-mediana mostrando una dependencia de la localidad de colecta. Comparativamente, en Bahía Tortugas *M. californianus* acumula el Cu, Mn y Cd en una proporción tres veces menor que *M. modiolus* al mismo nivel de exposición. En cuanto a la distribución geográfica en el Mar de Cortes, esta fue similar para el Mn, Al y Zn con mayores concentraciones en la parte norte, probablemente debido a que los mejillones se encuentran expuestos a estos metales asociados al material sedimentario resuspendido en el Delta del Río Colorado. El Cd presentó niveles de 70 y 27  $\mu\text{g g}^{-1}$  de peso seco (p.s.) en Bahía Tortugas y Bahía de Los Angeles, respectivamente, localidades expuestas a fenómenos de surgencia costera. El Cu presentó niveles relativamente bajos ( $< 35 \mu\text{g g}^{-1}$  p.s.) con excepción de Santa Rosalía (89  $\mu\text{g g}^{-1}$  p.s.), conocida por la explotación minera de Cu realizada en esta zona. El As, Se y Ag, presentaron poca variabilidad en el área estudiada, con niveles bajos que probablemente reflejen niveles naturales en las localidades estudiadas.

## INDICE

	Página
<b>1. INTRODUCCION</b>	1
<b>1.1 Objetivos</b>	3
<b>1.2 Hipótesis</b>	3
<b>2. MATERIALES Y METODOS</b>	4
<b>2.1. Descripción del área de estudio.</b>	4
<b>2.2 Colecta de muestras</b>	5
<b>2.3 Análisis químicos y cuantificación de metales en organismos</b>	7
<b>2.4. Cálculo del índice de condición</b>	8
<b>3. RESULTADOS</b>	10
<b>3.1 Características biológicas.</b>	10
<b>3.2 Metales pesados</b>	10
<b>3.2.1. Distribución espacial de metales por clases de tallas.</b>	10
<b>3.2.2. Concentración de metales en <i>M. modiolus</i> y <i>M. californianus</i> de Bahía Tortugas.</b>	16
<b>3.2.3. Efecto de la talla sobre la concentración de metales.</b>	16
<b>4. DISCUSION</b>	19
<b>5. CONCLUSIONES</b>	24
<b>7. LITERATURA CITADA</b>	26

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Página</b>
<b>Figura 1</b> Localidades de colecta de mejillones <i>Modiolus capax</i> en el Mar de Cortes y de <i>Modiolus modiolus</i> y <i>Mytilus californianus</i> en Bahía Tortugas.	6
<b>Figura 2</b> Concentración de metales ( $\mu\text{g g}^{-1}$ peso seco) en mejillones separados por las diferentes clases de tallas. P.E. Punta Estrella; B.A. Bahía de Los Angeles; S.R. Santa Rosalía; B.T.M. Bahía Tortugas <i>M. Modiolus</i> ; B.T.C. Bahía Tortugas <i>M. californianus</i> .	13
<b>Figura 3</b> Relación entre la concentración de metales ( $\mu\text{g g}^{-1}$ peso seco) y la talla de los mejillones <i>Modiolus sp.</i>	17

## LISTA DE TABLAS

		Página
<b>Tabla I</b>	Concentración de metales ( $\mu\text{g g}^{-1}$ peso seco $\pm$ desviación estándar) en muestras de referencia certificadas por la National Institute of Standard and Technology-EUA (NIST) y los resultados obtenidos por el Instituto de Investigaciones Oceanológicas-UABC (IIO-UABC).	9
<b>Tabla II</b>	Variables biológicas de los mejillones <i>Modiolus capax</i> , <i>Modiolus modiolus</i> y <i>Mytilus californianus</i> , en tres tallas colectadas en cada localidad (n=15).	11
<b>Tabla III</b>	Concentración promedio de metales ( $\mu\text{g g}^{-1}$ peso seco) por clases de talla de mejillones ( <i>Modiolus sp</i> ). Los promedios que presentan letras iguales no son significativamente diferentes ( $\alpha = 0.05$ ).	12

## DEDICATORIA

A mis padres:  
*FRANCISCO Y REBECA,*  
Por todo su amor y comprensión  
de siempre.

A mis hijos:  
*TOÑO y GABY.*

*A JOSE ANTONIO*

A mis hermanos:  
*TITA, PACO y MIGUEL*  
y la rabiada.

## AGRADECIMIENTOS

Al Instituto de Investigaciones Oceanológicas (IIO), de la Universidad Autónoma de Baja California.

De manera infinita, agradezco a: Dr. Efraín A. Gutiérrez Galindo, P. O. Gilberto Flores Muñoz y a M.C. Julio Villaescusa Celaya, su ayuda desinteresada para el buen término de este trabajo, después de once años de haber iniciado.

A M. C. Raul Canino Herrera, por la revisión del presente trabajo.

A mis compañeros y amigos: Consuelo Chirino, Sandra Alvarez, Francisco Navarro, Ana Lilia Diaz, Alis y mi colega Zaul Garcia.

## 1. INTRODUCCION

Los contaminantes derivados de la industrialización y urbanización del medio ambiente costero, presenta un efecto tanto en los componentes bióticos como abióticos del ecosistema marino. El impacto sobre la salud del ecosistema depende de la distribución, destino, biodisponibilidad y metabolismo de estos materiales.

Los elementos o sustancias que afectan el balance natural de los sistemas acuáticos son principalmente nutrientes, metales pesados y químicos sintéticos (Prosi y Golberg, 1981). Los metales pesados, se clasifican en biológicamente esenciales y no esenciales. Los elementos esenciales (e.g. Cu, Zn, y Fe), son aquellos que intervienen en el metabolismo de los organismos, pero en altas concentraciones pueden presentar problemas de toxicidad. Los metales no esenciales (e.g. Hg, Cd y As), son aquellos que no se conoce que cumplan una función biológica y por lo tanto son tóxicos a concentraciones mucho mas bajas.

Los metales pesados, son constituyentes naturales del agua de mar, y son derivados de la erosión de las rocas, vulcanismo e hidrotermalismo, principalmente. Estos elementos se interrelacionan con el medio ambiente, mediante un balance conocido como ciclos biogeoquímicos naturales (Garrels, *et al.*, 1975; Lantzy y Mackenzie, 1979). El aumento en la actividad industrial, a generado como subproducto una gran cantidad de metales que han sido descargados al medio ambiente a niveles tan importantes que afecta los ciclos naturales de los elementos (Garrels, *et al.*, 1975). Se ha considerado que en algunos casos la movilización antropogénica de metales pesados puede ser tan importante y aún exceder la movilización natural.

El interés por estudiar los metales pesados como un problema de contaminación ambiental, surge posterior a los envenenamientos masivos ocurridos en Japón en los años 50's por intoxicaciones debidas al Hg (enfermedad de Minamata), y al Cd (enfermedad de "itai-itai") (Forstner y Wittmann, 1979). Los estudios de la contaminación por metales pesados en el medio ambiente marino, tienen el propósito de proteger los ecosistemas marinos costeros, en general y la salud humana en particular. Con este fin, se ha propuesto el empleo de organismos centinelas como indicadores biológicos cuantitativos de la contaminación por metales pesados en el medio marino (Goldberg, 1975). Para esto se han empleado principalmente a moluscos bivalvos, particularmente mejillones, debido a que estos organismos son capaces de mostrar un nivel integrado en el tiempo de los metales

biodisponibles en el ambiente, además son recomendados como alternativos a los análisis en sedimentos y agua, porque ofrecen información sobre la fracción biodisponible de estos contaminantes.

Los atributos de un organismo para poder ser empleado como centinela, fueron descritos por Phillips (1977) y Phillips y Segar (1986). El organismo debe tener la capacidad de acumular al contaminante, debe ser sedentario y representativo del área amplia, ser lo suficientemente longevos para mostrar más de una clase de edad, debe proveer suficiente tejido para los análisis químicos y tolerar amplios rangos de salinidad; entre los más importantes.

La acumulación de metales es un proceso complejo, gobernado por una variedad de procesos externos e internos. Los factores que tienen un papel determinante en la acumulación de los metales son la talla de los organismos (Boyden, 1974, 1977; Cossa *et al.*, 1979), el sexo (Orren *et al.*, 1980; La Touche y Mix, 1982), la composición bioquímica de los organismos y factores genéticos (Frazier *et al.*, 1985), los ciclos de desove (Lobel y Wright, 1982), la biodisponibilidad de la especie del metal, temperatura y salinidad (Phillips, 1976).

En las últimas décadas se han desarrollado programas extensivos de monitoreo de contaminación marina en los que se han utilizado mejillones como organismos centinelas. Entre estos, destaca el programa iniciado en la década de los 70's, conocido como International Mussel Watch (Goldberg *et al.*, 1978). Por su amplia distribución geográfica, los moluscos bivalvos que con mayor frecuencia se utilizan como indicadores de contaminación son los mejillones del género *Mytilus*, así como también el ostión del género *Crassostrea spp.* y *Ostrea spp.* También, mejillones del género *Modiolus* se ha utilizado en diversos estudios de contaminación por metales pesados en la zona costera (Segar *et al.*, 1971; Julshamn, 1981).

En la costa oriental de Baja California, se han desarrollado algunos estudios de contaminación por metales pesados, empleando al mejillón *Modiolus capax* como organismo centinela, dado que esta especie reúne la mayoría de los requisitos señalados para ser utilizado como bioindicador (Olguín-Espinoza, 1989; Da Costa Gómez-Bueno y Valle-Díaz, 1989). Estos autores analizaron el efecto del talla de los organismos sobre los niveles de metales en *Modiolus capax*, colectados en Bahía de los Angeles (situada en el Mar de Cortés) y encontraron que el Zn, Cu y Mn no mostraron una relación clara con respecto a la talla de los

organismos, mientras que el Cd tiende a concentrarse en organismos de mayor tamaño y el Al mostró un comportamiento inverso, es decir niveles altos en organismos de menor tamaño.

### 1.1 Objetivos

- Evaluar la variación de los metales pesados (Cu, Mn, Zn, Al, Cd, Ag, As y Se) entre las tres clases de tallas de *Modiolus capax* colectados en Punta Estrella, Bahía de los Angeles y Santa Rosalía en el Golfo de California y de *Modiolus modiolus* y *Mytilus californianus* colectados en la localidad de Bahía Tortugas en el Pacífico.
- Conocer y comparar las concentraciones de los metales pesados en las distintas especies de mejillones entre las cuatro localidades de colecta.

### 1.2 Hipótesis

De acuerdo con los antecedentes y al conocimiento del área de estudio, se espera encontrar que los mejillones colectados en la parte norte del Golfo de California se encuentren influenciados por el material terrígeno que aporta el delta del Río Colorado. Por lo tanto, se espera un enriquecimiento de elementos asociados a este tipo de materiales (e.g. Al y Mn) y una disminución al sur del área de estudio.

Así mismo, se espera encontrar una mayor concentración de metales pesados, particularmente Cu, en mejillones colectados en Santa Rosalía, debido a su exposición al material residual de la actividad minera que se desarrolla en esa localidad.

Se reconoce que altos niveles de cadmio en aguas superficiales está asociado a fenómenos de surgencia y mezcla de la columna de agua, por lo que se espera encontrar mayores niveles de Cd en mejillones colectados en localidades expuestas a estas condiciones.

Se espera encontrar los niveles de concentración de metales similares en Bahía Tortugas en los mejillones *Modiolus modiolus* y *Mytilus californianus*, por estar expuestos a las mismas condiciones ambientales.

Es conocido la dependencia de la localidad sobre la incorporación de metales por los organismos marinos (Phillips, 1980). Por lo tanto, se espera que sólo aquellos elementos que presenten poca variabilidad espacial, muestren un efecto de la talla sobre la acumulación de metales.

## 2. MATERIALES Y METODOS

### 2.1. Descripción del área de estudio

El Golfo de California es un mar marginal que se encuentra localizado en un medio ambiente árido, entre la Península de Baja California y los Estados de Sonora y Sinaloa, comunicándose directamente con el Océano Pacífico (Alvarez-Borrego, 1983). Su extensión Noroeste-Sureste es aproximadamente de 1000 km y entre 150 a 250 km de ancho. Hidrológicamente, el Golfo se puede dividir en dos provincias, la primera, al Norte de las Islas Angel de la Guarda y Tiburón, y la segunda, al Sur. La parte Norte se caracteriza por tener fuertes corrientes ciclónicas originadas por marea, lo que provoca una mayor homogeneización en la columna de agua. Las fronteras desérticas de esta zona influyen en el clima, por lo que encontramos temperaturas más continentales que marítimas; las aguas superficiales varían en 10 °C en invierno hasta cerca de 32°C en verano, la salinidad varía de 36.5 ppm en invierno a más de 38.5 ppm en verano, siendo mayor en la parte norte. En la parte Sur encontramos condiciones más oceánicas, caracterizándose por una disminución en la salinidad (Noroeste-Sureste) de 37.5 ppm a 35.5 ppm, existiendo poca variación estacional de 0.5 a 1ppm. y la temperatura no muestra ninguna estructura especial (Alvarez-Borrego, 1983).

Hidrológicamente, el Golfo de California ha sido bien caracterizado (Alvarez-Borrego, 1983; Alvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991). En el Golfo de California ocurren procesos de mezcla originados por viento y marea. Los procesos de mezcla debida a la marea son mucho más importantes en la región norte del Golfo de California y ocurren todo el año. El patrón estacional de vientos, causa procesos de surgencia en la costa de Baja California durante verano, mientras que en invierno el patrón de vientos se invierte causando fenómenos de surgencia en las costas de Sonora-Sinaloa. También ocurren fuertes procesos de mezcla en el Canal de Ballenas durante todo el año, ya que es un lugar estrecho que comunica la parte Norte con el Sur, aquí se encuentran los valores más altos de nutrientes en aguas superficiales. Estos procesos causan una excepcional productividad de fitoplancton, con tasas en el Golfo comparables a las áreas de surgencias de la costa oeste de Baja California.

Durante el período comprendido entre 1891 a 1931, el Río Colorado aportó aproximadamente  $160 \times 10^6$  ton de sedimentos anualmente, a una razón que varió entre varias decenas de ton por día hasta miles de ton por segundo (Van Andel, 1964). En contraste, desde 1962 el flujo del Río Colorado ha sido atrapado en su mayor parte en la cuenca baja, mientras

que el resto se retiene en los Valles de Imperial (EUA) y Mexicali (México). De hecho, el aporte de material sedimentario por parte del río ha sido prácticamente nulo desde 1960.

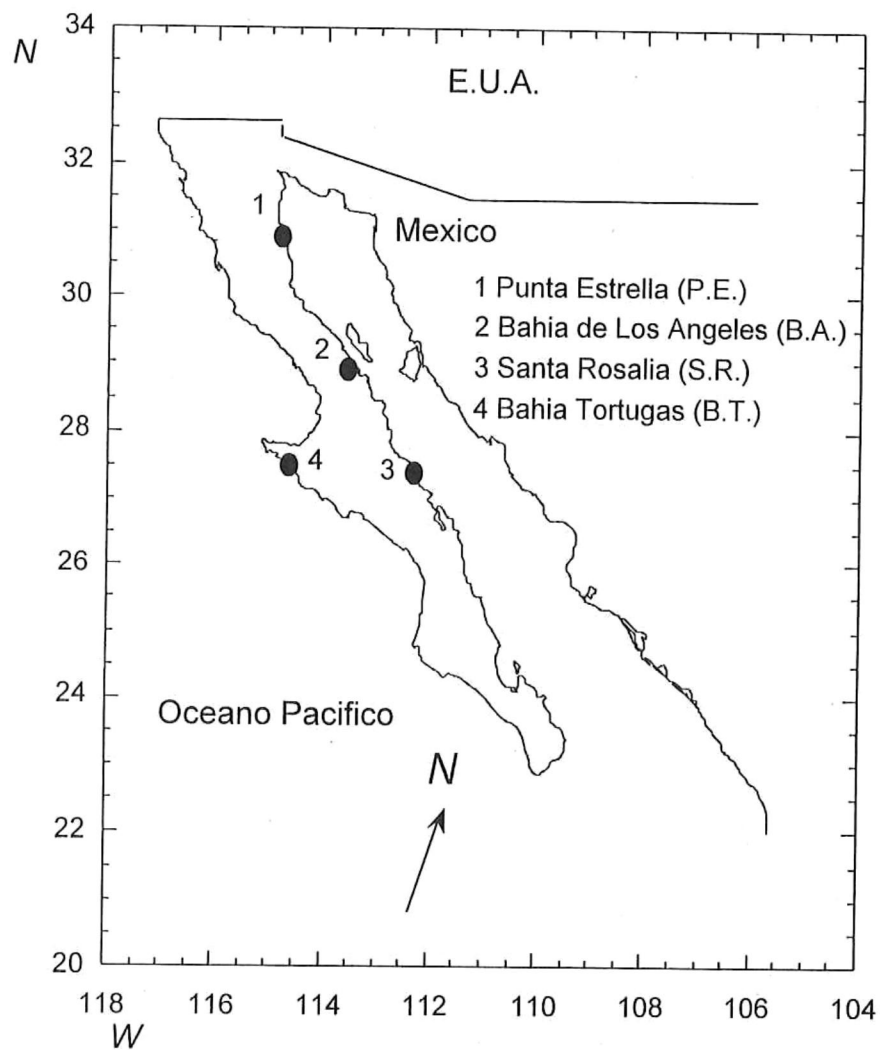
Bahía Tortugas, es una zona de clima árido, dónde la costa esta expuesta a erosión constante, por oleaje de alta energía. La costa Occidental de Baja California ha sido estudiada en varios aspectos de su oceanografía, sin embargo, los estudios se han centrado principalmente en la costa Norte, hacia arriba de Punta Eugenia y son escasos hacia la parte Sur. Las temperaturas promedio de la zona varían entre 16 a 18°C, con salinidad promedio de 33.5 ppm, donde ocurren surgencias estacionales, con mayor intensidad en marzo (De la Lanza-Espino, 1991).

El área de estudio y las localidades de muestreo de mejillones *Modiolus capax* en el Mar de Cortés y de *Modiolus modiolus* y *Mytilus californianus* en el Pacífico se muestran en la Figura 1.

## 2.2 Colecta de muestras

Se colectaron durante noviembre de 1988, mejillones de la especie *Modiolus capax*, *Modiolus modiolus* y *Mytilus californianus* utilizando guantes de tela y cuchillo para buceo de acero inoxidable. Los mejillones se limpiaron en el campo y se colocaron en bolsas de plástico con cierre hermético previamente descontaminada. Cada muestra fue etiquetada y congelada con hielo seco (CO<sub>2</sub> sólido) a -20°C, hasta su posterior análisis en el laboratorio.

Todo el material utilizado en la colecta y el utilizado en el laboratorio, fue previamente descontaminado, primero con una solución detergente libre de fosfatos (Alconox<sup>®</sup> 15%). El material se enjuagó tres veces con agua destilada y tres veces con agua desionizada (18 megaohms), después se dejó en una solución de HCl (material de plástico) ó HNO<sub>3</sub> (material de vidrio) al 50% (v/v), hasta su uso. El laboratorio dónde se llevaron a cabo las oxidaciones del material biológico y análisis de metales fue diseñado para reducir al máximo cualquier contaminación externa e interna, provisto de presión positiva con aire limpio y filtrado.



**Figura 1.** Localidades de colecta de mejillones *Modiolus capax* en el Mar de Cortes y de *Modiolus modiolus* y *Mytilus californianus* en Bahía Tortugas.

### 2.3 Análisis químicos y cuantificación de metales en organismos

Los mejillones se descongelaron y se hizo una selección de 45 organismos por cada clase de talla (clase grande: 88-98 mm; clase mediana: 70-87 mm; clase chica; 56-66mm) para todas las localidades de muestreo. Los organismos fueron enjuagados y se eliminó el sedimento y material biológico adheridos a la superficie exterior de las conchas, posteriormente se enjuagaron con agua desionizada para preveer una posible contaminación en los pasos posteriores de análisis. Para el análisis, se separaron tres réplicas integradas de 15 organismos cada una, para reducir el mínimo la variación individual de la concentración de los metales. A todos los organismos se les eliminó el viso, y el tejido de la gónada (Oullette, 1981). A la primera réplica se le tomaron sus características biométricas, cómo son largo, ancho y alto, peso de tejido y gónada de manera individual. El material biológico obtenido se homogenizó en un homogenizador Virtis<sup>®</sup> 45, equipado con navajas de titanio. El porcentaje de humedad se obtuvo tomando de 1 a 2 g de tejido homogenizado secado a 72°C por tres días.

La digestión del tejido para la determinación de la mayoría de estos metales se realizó de acuerdo al método utilizado en el programa de vigilancia sistemática de California E.U.A. (California State Mussel Watch) (Stephenson *et al.*, 1979). Se pesó una alícuota de tejido homegenizado de 3 a 5 g en vasos de precipitado de 30 mL y se les agregó 5 mL de HNO<sub>3</sub> concentrado grado Ultrex. Los vasos se cubrieron con un vidrio de reloj y se dejó reposar toda la noche a temperatura ambiente. Al día siguiente, lentamente se subió la temperatura a 40 °C, hasta que la muestra se encontró en solución. Posteriormente se subió la temperatura a 66 °C y se mantuvo en reflujo constante por un periodo de 2 a 3 hrs. Al terminar, se retiró el vidrio de reloj y se dejó evaporar hasta 1 mL, se le agregó 1 mL de agua deionizada y se dejó evaporar casi a sequedad. Finalmente, a cada muestra se le agregó 20 mL de HNO<sub>3</sub> (1%, v/v), y se transfirieron a frascos de polipropileno de 30 mL hasta su análisis de metales por espectrofotometría de absorción atómica.

Debido a su volatilidad, para el análisis de As y Se, se empleó una técnica diferente, descrita por Gutierrez-Galindo *et al.* (1994). En cada caso, 5 g de tejido homogenizado fue tratado con 5 mL de una solución de Mg(NO)<sub>3</sub>.5H<sub>2</sub>O al 40% (w/v) y llevadas a sequedad a 80 °C toda la noche. Al siguiente día se aumentó la temperatura gradualmente (100 °C por hora),

hasta alcanzar 500 °C, donde permaneció por 5 hrs. Finalmente, las muestras se dejaron enfriar y cada una se aforó a 25 mL con HCl 4N.

Para el análisis de arsénico se tomó una alícuota de 0.5 mL del digerido final y se aforó a 50 mL con HCl 4N. Previo al análisis instrumental, a cada muestra se agregó 0.05 mL de una solución de KI 50% (w/v) y se dejó reposar 30 min. Para el análisis de Se, se tomó 5 mL de digerido final y se aforó a 50 mL con HCl 6.6 N.

La cuantificación de los metales se realizó en un espectrofotómetro de absorción atómica Thermo Jarell Ash (TJA), modelo Smith Hieftje 12. Los metales Zn, Cu, Cd y Mn se determinaron con una llama aire acetileno y para el Al, con llama de aire-óxido nitroso. Para el análisis de Ag, se utilizó un horno de grafito modelo TJA CTF 188, equipado con un inyector automático Fastac II.

Los metales As y Se, fueron cuantificados en un generador de hidruros TJA, modelo AVA 440 colocado sobre el espectrofotómetro de absorción atómica. Para el As se empleó una solución reductora de NaBH 1% (w/v) en NaOH 1% (w/v), mientras que para el Se se empleó una solución NaBH 0.1% (w/v) en NaOH 1% (w/v).

Como control de calidad de los procedimientos analíticos empleados, por cada grupo de 15 muestras, se analizó un estándar de referencia de hojas de huerto SRM1571, hojas de cítrico SRM1572, e hígado de bovino SRM1577a (Tabla I), de la National Institute of Standard and Technology-EUA (NIST) y un blanco de procedimiento.

#### **2.4. Cálculo del índice de condición**

El Índice de condición de los mejillones se calculó de la siguiente manera:

I.C. = Peso seco del tejido sin gónada (mg)/Largo\*Ancho\*Alto (cc).

**Tabla I.** Concentración de metales ( $\mu\text{g g}^{-1}$  peso seco  $\pm$  desviación estándar) en muestras de referencia certificadas por la National Institute of Standard and Technology-EUA (NIST) y los resultados obtenidos por el Instituto de Investigaciones Oceanológicas-UABC (IIO-UABC).

	<b>Cu</b>	<b>Mn</b>	<b>Zn</b>	<b>Al</b>	<b>Cd</b>	<b>Ag</b>	<b>As</b>	<b>Se</b>
<b>Hojas de cítrico SRM 1571</b>								
Certificado	16.5(1)	23(2)	29(2)	92(15)	0.03(0.01)	NC	3.1	NA
IIO-UABC	14.6(0.3)	21.8(3.9)	29.7(1.6)	89.8(16.7)	ND	NA	3.32(0.5)	NA
<b>Hojas de huerto SRM 1572</b>								
Certificado	12	91	25	NC	0.1	NC	NC	NC
IIO-UABC	10.9(0.3)	99.9(6)	22.5(2.9)	110(10)	ND	NA	NA	NA
<b>Hígado de bovino SRM 1577a</b>								
Certificado	158(7)	9.9(0.8)	123(8)	NC	0.44(0.06)	0.06	NC	0.7
IIO-UABC	169(7)	8.1(0.3)	119(4)	24.3(5.7)	0.4	0.04	NA	0.4(0.03)

ND= No detectado

NC= No certificado.

NA= No analizado

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Características biológicas

Los resultados obtenidos para las variables biométricas, peso húmedo, porcentaje de humedad e índice de condición en los mejillones colectados se muestran en la Tabla II. En Punta Estrella, el promedio de peso húmedo de los mejillones *M. capax* varió en un intervalo de 5.48-11 g, el índice de condición de 9-11.4 mg/cc, y 87-88% de humedad. En Bahía de los Angeles, el porcentaje de humedad promedio fue de 84%, el peso húmedo de los mejillones *M. capax* se encontró entre 5.21-12.5 g, y el intervalo del índice de condición calculado fue de 13.6-17.0 mg/cc. En Santa Rosalía sólo se encontraron mejillones *M. capax* de tallas grandes y medianas, el índice de condición para estos varió entre 13.2-16.4 mg/cc, el porcentaje de humedad de 77 – 85% y el peso húmedo entre 9.79-13.4g. Finalmente, para Bahía Tortugas, los mejillones *Modiolus modiolus* muestreados, presentaron un rango de peso húmedo de 7.69-25.7 g, el porcentaje de humedad entre 83-85% y el índice de condición entre 19.2-21.2, mientras que para el mejillón *M. californianus* el peso húmedo varió entre 7.11-18.1 g, el porcentaje de humedad se encontró entre 80-82% y el índice de condición con poca variación entre 20.2-20.4 mg/cc.

#### 3.2 Metales pesados

##### 3.2.1. Distribución espacial de metales por clases de tallas

Las concentraciones promedio, así como el resultado del análisis de varianza para ver diferencias espaciales de Cu, Mn, Zn, Al, Cd, Ag, As y Se en los mejillones *Modiolus sp.*, en las diferentes clase de talla se muestran en la la Tabla III, y gráficamente en la Figura 2.

**Cobre.** El Cu mostró el mismo comportamiento espacial en el área de estudio independientemente de la talla (Fig. 2). Las mayores concentraciones de Cu se midieron en mejillones de Santa Rosalía y las menores en Bahía de Los Angeles. Tal como se muestra en la Tabla III, las diferencias de Cu entre localidades fueron estadísticamente significativas ( $\alpha = 0.05$ ). Para mejillones de talla grande, las concentraciones de Cu variaron entre 58.6  $\mu\text{g g}^{-1}$  p.s. en Santa Rosalía a 4.92  $\mu\text{g g}^{-1}$  peso seco (p.s.) en Bahía de Los Angeles. En mejillones de talla mediana, las concentraciones variaron entre 89  $\mu\text{g g}^{-1}$  p.s. a 7.06  $\mu\text{g g}^{-1}$  p.s. y para mejillones de talla pequeña este comportamiento no fué confirmado debido a que no se colectaron mejillones de esta clase de talla en Santa Rosalía. Para mejillones de talla chica las concentraciones se encontraron entre 23.8  $\mu\text{g g}^{-1}$  p.s. para Punta Estrella a 11.9  $\mu\text{g g}^{-1}$

**Tabla II.** Variables biológicas de los mejillones *Modiolus capax*, *Modiolus modiolus* y *Mytilus californianus*, en tres tallas colectadas en cada localidad (n=15).

Punta Estrella (*Modiolus capax*)

Talla	P. húmedo g	Hum %	Largo mm	Ancho mm	Alto mm	IC mg/cc
Grande	11.0	87	90.3	42.2	36.5	10.3
Mediana	8.66	88	83.2	42.4	32.9	9.01
Chica	5.48	87	64.8	36.2	26.9	11.4

Bahia de los Angeles (*Modiolus capax*)

Talla	P. húmedo g	Hum %	Largo mm	Ancho mm	Alto mm	IC mg/cc
Grande	12.5	84	89.6	43.1	35.6	17.0
Mediana	10.7	84	87.3	42.1	34.1	13.6
Chica	5.21	84	66.1	35.0	26.3	13.8

Santa Rosalia (*Modiolus capax*)

Talla	P. húmedo g	Hum %	Largo mm	Ancho mm	Alto mm	IC mg/cc
Grande	13.4	77	98.6	47.4	40.2	16.4
Mediana	9.79	85	75.5	43.0	34.4	13.2
Chica	NC	NC	NC	NC	NC	NC

Bahia Tortugas (*Modiolus modiolus*)

Talla	P. húmedo g	Hum %	Largo mm	Ancho mm	Alto mm	IC mg/cc
Grande	25.7	83	88.5	46.4	50.3	21.2
Mediana	13.4	85	70.1	37.1	40.2	19.2
Chica	7.69	83	56.3	33.4	33.2	21.0

Bahia Tortugas (*Mytilus californianus*)

Talla	P. húmedo g	Hum %	Largo mm	Ancho mm	Alto mm	IC mg/cc
Grande	18.1	80	94.3	43.5	43.1	20.4
Mediana	12.8	82	78.6	40.2	37.1	20.2
Chica	7.11	82	63.7	35.1	29.4	20.2

NC = No colectado

**Tabla III.** Concentración promedio de metales ( $\mu\text{g g}^{-1}$  peso seco) por clases de talla de mejillones (*Modiolus sp*). Los promedios que presentan letras iguales no son significativamente diferentes ( $\alpha = 0.05$ ).

Talla Grande

	<b>Cu</b>	<b>Mn</b>	<b>Zn</b>	<b>Al</b>	<b>Cd</b>	<b>Ag</b>	<b>As(*)</b>	<b>Se</b>
P. Estrella	23.7a	1628b	295c	635c	5.11a	0.4a	13.3	3.66ab
B. Angeles	4.92a	65.7a	126a	151a	27.3c	0.81b	14.2	2.34a
Sta Rosalia	58.6b	462a	170ab	228ab	13.6a	1.13c	24.6	2.4a
B Tortugas	34.1c	216a	209b	280b	68.9b	0.49a	16.7	1.45a

Talla mediana

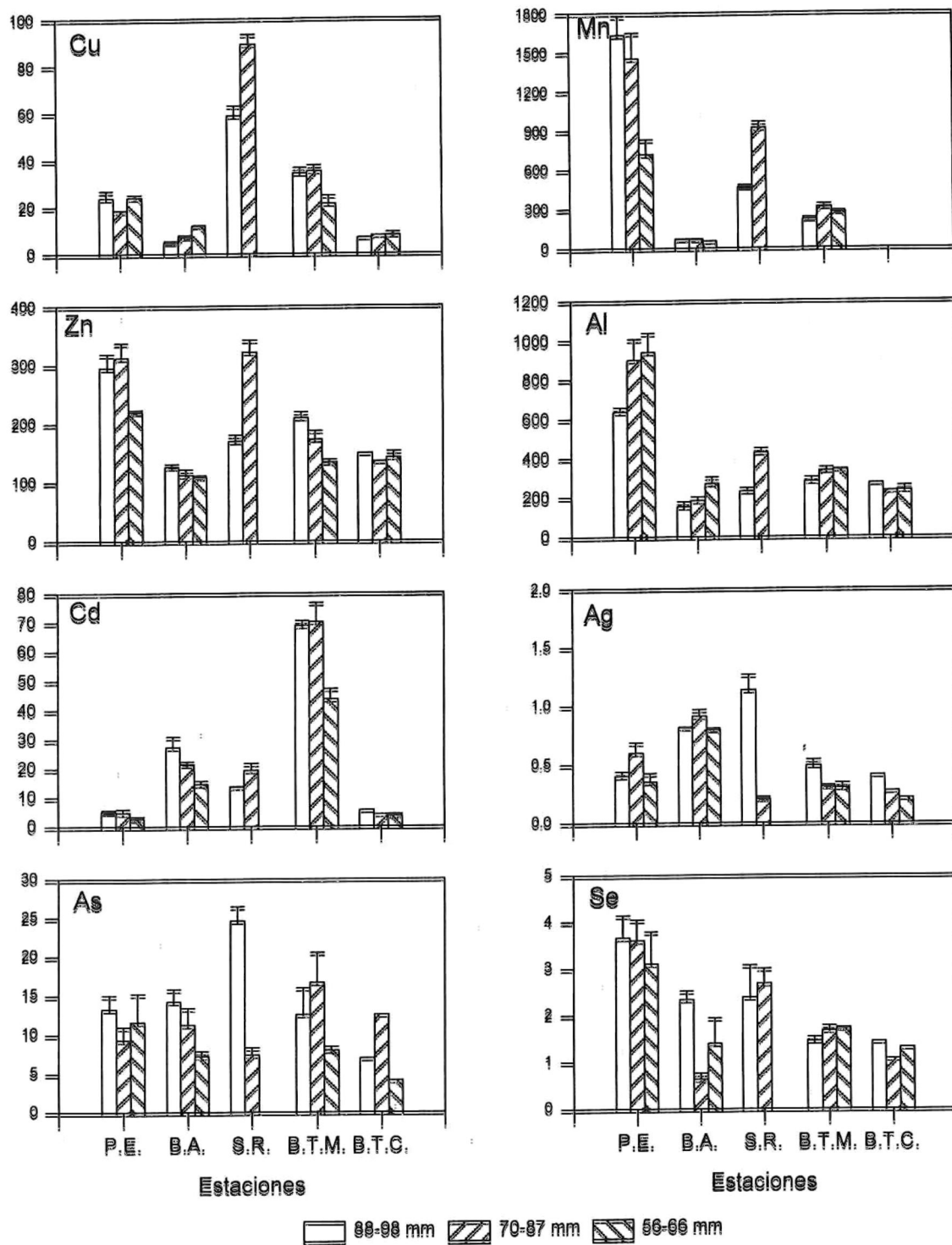
	<b>Cu</b>	<b>Mn</b>	<b>Zn</b>	<b>Al</b>	<b>Cd</b>	<b>Ag</b>	<b>As(*)</b>	<b>Se</b>
P. Estrella	18.4a	1445b	312a	900b	4.79c	0.6a	9.3	3.6a
B. Angeles	7.06a	63.1a	113c	182a	21.3a	0.91c	11.3	0.64c
Sta Rosalia	89c	916b	321a	426a	19.4a	0.2ab	7.44	2.69ab
B Tortugas	34.9b	311a	173bc	195a	70.2b	0.31b	8.07	1.68bc

Talla chica

	<b>Cu</b>	<b>Mn</b>	<b>Zn</b>	<b>Al</b>	<b>Cd</b>	<b>Ag</b>	<b>As(*)</b>	<b>Se</b>
P. Estrella	23.8a	717b	219b	939b	2.73c	0.35a	11.6	3.10a
B. Angeles	11.9b	50.7a	109c	269a	14.5b	0.79b	7.22	1.40a
Sta Rosalia	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC
B Tortugas	21.2a	270a	134a	340a	43.7a	0.31a	7.98	1.72a

NC = No colectado.

(\*) = No existen diferencias significativas ( $\alpha = 0.05$ ).



**Figura 2.** Concentración de metales ( $\mu\text{g g}^{-1}$  peso seco) en mejillones separados por las diferentes clases de tallas. P.E. Punta Estrella; B.A. Bahía de Los Angeles; S.R. Santa Rosalía; B.T.M. Bahía Tortugas *M. Modiolus*; B.T.C. Bahía Tortugas *M. californianus*.

p.s. en Bahía de Los Angeles. Independientemente de las variaciones en concentración de Cu para las diferentes tallas, la razón máximo/mínimo (máx/mín) para las primeras dos clases de tallas fué muy similar (12 y 12.6 para grandes y medianos, respectivamente), mientras que para mejillones pequeños sólo fue de 2.

**Manganeso.** El Mn mostró las mayores diferencias entre localidades, comparados con el resto de los elementos estudiados (Tabla III). Las razones máx/mín de Mn fueron de 24.8, 22.9 y 14.1 para mejillones grandes, medianos y chicos, respectivamente. Este comportamiento se debió a las altas concentraciones de Mn medido en mejillones colectados en Punta Estrella, para las tres clases de tallas estudiadas (Fig. 2). Las concentraciones de Mn se encontraron entre  $1,628 \mu\text{g g}^{-1}$  p.s. en Punta Estrella a  $65.7 \mu\text{g g}^{-1}$  p.s. en Bahía de Los Angeles, en mejillones de talla grande. Para mejillones de talla mediana, las concentraciones de Mn variaron entre  $1,445 \mu\text{g g}^{-1}$  p.s. en Punta Estrella hasta  $63.1 \mu\text{g g}^{-1}$  p.s. en Bahía de Los Angeles. Finalmente, en mejillones de talla pequeña el Mn se encontró entre  $717 \mu\text{g g}^{-1}$  p.s., también en Punta Estrella a  $50.7 \mu\text{g g}^{-1}$  p.s. en Bahía de Los Angeles.

**Zinc.** En contraste con el Mn, el Zn fue de los elementos menos variables en el area de estudio (Fig. 2). Sin embargo, este elemento mostró diferencias espaciales estadísticamente significativas ( $\alpha = 0.05$ ) en las tres clases de talla (Tabla III). En mejillones de talla grande, las concentraciones promedio de Zn variaron entre  $295 \mu\text{g g}^{-1}$  p.s. en Punta Estrella a  $126 \mu\text{g g}^{-1}$  p.s. en Bahía de Los Angeles, con una razón máx/mín de 2.34. En contraste, para los mejillones de talla mediana la concentración más alta de Zn se encontró en Santa Rosalía ( $321 \mu\text{g g}^{-1}$  p.s.) y la mas baja en Bahía de Los Angeles ( $113 \mu\text{g g}^{-1}$  p.s.), con una razón máx/min de 2.84. Para mejillones de talla chica, la razón máx/mín fué de 2.01 encontrandose la mayor concentración promedio también en Punta Estrella ( $219 \mu\text{g g}^{-1}$  p.s.) y la menor en Bahía de Los Angeles ( $109 \mu\text{g g}^{-1}$  p.s.).

**Aluminio.** A pesar de ser un elemento litogénico, el Al en los mejillones estudiados varió poco en las tres clases de talla, para todas las localidades (Tabla III, Fig. 2). En mejillones de talla grande, las concentraciones de Al se encontraron entre  $635 \mu\text{g g}^{-1}$  p.s. en Punta Estrella a  $151 \mu\text{g g}^{-1}$  p.s. en Bahía de Los Angeles. Para mejillones de talla mediana, las concentraciones de Al variaron entre  $900 \mu\text{g g}^{-1}$  p.s. en Punta Estrella hasta  $182 \mu\text{g g}^{-1}$  p.s. en Bahía de Los Angeles, mientras que para la talla chica, el rango de concentración fué de  $939 \mu\text{g g}^{-1}$  p.s. en Punta Estrella a  $269 \mu\text{g g}^{-1}$  p.s. en Bahía de Los Angeles. Las razones máx/min

calculadas para el Al fueron de 4.21, 4.95 y 3.49, para mejillones grandes, medianos y chicos, respectivamente.

**Cadmio.** El Cd mostró una variabilidad relativamente elevada en el área de estudio (Fig. 2). Para las tres clases de tallas colectadas, las concentraciones fueron significativamente mayores ( $\alpha = 0.05$ ) en los mejillones *M. modiolus* colectados en el Pacífico (Tabla III). También, el Cd mostró concentraciones relativamente altas en Bahía de Los Angeles, en las tres clases de talla de *M. capax*, comparada con el resto del Golfo de California; pero significativamente menores ( $\alpha = 0.05$ ) que los mejillones de Bahía Tortugas. La concentración de Cd varió entre  $68.9 \mu\text{g g}^{-1}$  p.s. en Bahía Tortugas a  $5.11 \mu\text{g g}^{-1}$  p.s. en Punta Estrella, para mejillones de talla grande. En mejillones medianos, las concentraciones fueron de  $70.2 \mu\text{g g}^{-1}$  p.s. en Bahía Tortugas a  $4.79 \mu\text{g g}^{-1}$  p.s. en Punta Estrella, y para talla chica entre  $43.7 \mu\text{g g}^{-1}$  p.s. a  $2.73 \mu\text{g g}^{-1}$  p.s., en las mismas localidades, respectivamente.

**Plata.** Los niveles de Ag en los mejillones colectados fueron consistentemente bajos, el comportamiento espacial fue relativamente heterogeneo y estadísticamente diferente ( $\alpha = 0.05$ ), independientemente de la talla (Tabla III). En mejillones de talla grande, la mayor concentración de Ag se encontró en Santa Rosalía ( $1.13 \mu\text{g g}^{-1}$  p.s.), y la menor en Punta Estrella ( $0.4 \mu\text{g g}^{-1}$  p.s.), con una razón máx/mín de 2.83. El intervalo de concentración de Ag en organismos de talla mediana fue de  $0.91 \mu\text{g g}^{-1}$  p.s. en Bahía de Los Angeles a  $0.2 \mu\text{g g}^{-1}$  p.s. en Santa Rosalía y una razón máx/mín calculada para esta clase de 4.55. Finalmente, para mejillones de talla chica la mayor concentración de Ag se encontró en Bahía de Los Angeles ( $0.79 \mu\text{g g}^{-1}$  p.s.) y la menor en Bahía Tortugas ( $0.31 \mu\text{g g}^{-1}$  p.s.), con una razón máx/min calculada de 2.55.

**Arsénico.** En contraste con el resto de los elementos estudiados, el As no mostró diferencias estadísticamente significativas ( $\alpha = 0.05$ ) entre localidades (Tabla III). Esto indica la poca variabilidad de este elemento en el área de estudio (Fig. 2). Las razones máx/min calculadas para las tres clases de tallas fueron de 1.85, 1.52 y 1.61 para mejillones de tallas grande, mediana y chica, respectivamente. Para organismos de talla grande la mayor concentración promedio se midió en Santa Rosalía ( $24.6 \mu\text{g g}^{-1}$  p.s.) y la menor en Punta Estrella ( $13.3 \mu\text{g g}^{-1}$  p.s.); en organismos de talla mediana, la mayor concentración promedio se encontró en Bahía de Los Angeles ( $11.3 \mu\text{g g}^{-1}$  p.s.) y la menor en Santa Rosalía ( $7.44 \mu\text{g g}^{-1}$  p.s.).

<sup>1</sup> p.s.). Finalmente, para organismos de talla chica la concentración mas alta se encontró en Punta Estrella ( $11.6 \mu\text{g g}^{-1}$  p.s.) y la mas baja en Bahía de Los Angeles ( $7.22 \mu\text{g g}^{-1}$  p.s.).

**Selenio.** El Se medido en los mejillones colectados mostró concentraciones relativamente bajas y una baja variabilidad espacial. Sin embargo, este elemento presentó diferencias estadísticamente significativas ( $\alpha = 0.05$ ) entre las localidades estudiadas (Tabla III). Las mayores concentraciones de Se se encontraron consistentemente en Punta Estrella ( $3.66$ ,  $3.60$  y  $3.10 \mu\text{g g}^{-1}$  p.s., en mejillones de talla grande, mediana y chica, respectivamente), mientras que la menor concentración de Se para organismos de talla grande se encontró en Bahía Tortugas ( $1.45 \mu\text{g g}^{-1}$  p.s.) y para tallas mediana y chica en Bahía de Los Angeles ( $0.64$  y  $1.40 \mu\text{g g}^{-1}$  p.s., respectivamente). Las razones máx/min calculadas para Se en las tres clases de tallas fue de 2.52, 5.63 y 2.21 para mejillones grandes, medianos y chicos, respectivamente.

### 3.2.2. Concentración de metales en *M. modiolus* y *M. californianus* de Bahía Tortugas

Los niveles de metales detectados en los mejillones *Modiolus modiolus* y *Mytilus californianus*, colectados en la misma localidad de Bahía Tortugas se muestra en la Fig. 2. Comparativamente se puede ver que la especie *M. californianus* acumula metales en menor cantidad con respecto a *M. modiolus* al mismo nivel de exposición. Esto se hace mas evidente para elementos como el Cu, Mn y Cd, donde los niveles encontrados en *M. californianus* corresponden a una tercera parte o menor (e.g. Mn) a los detectados en *M. modiolus*. En contraste, aunque las concentraciones de metales en *M. californianus* siempre fueron menores, estas diferencias fueron mucho menos evidentes para el Zn, Al, Ag, As y Se (Fig. 2).

### 3.2.3. Efecto de la talla sobre la concentración de metales

El comportamiento de los metales Cu, Mn, Zn, Al, Cd, Ag, As y Se con respecto a la talla (mm) de los mejillones *Modiolus sp*, se muestra en la Figura 3.

El Cu presenta concentraciones relativamente bajas ( $< 40 \mu\text{g g}^{-1}$  p.s.) e independientes de la talla, exceptuando la localidad de Santa Rosalía, donde existe un aporte conocido de este elemento al medio ambiente. En Santa Rosalía las concentraciones de Cu son aproximadamente de dos a tres veces mayores los niveles del resto de las localidades (Tabla II; Fig. 2), y los organismos de talla mediana tienden a concentrar mayormente el Cu comparado con organismos de talla grande (Fig. 3). El Zn, Cd y Se presentaron una alta variabilidad regional y no muestra una tendencia clara con respecto a la talla de los

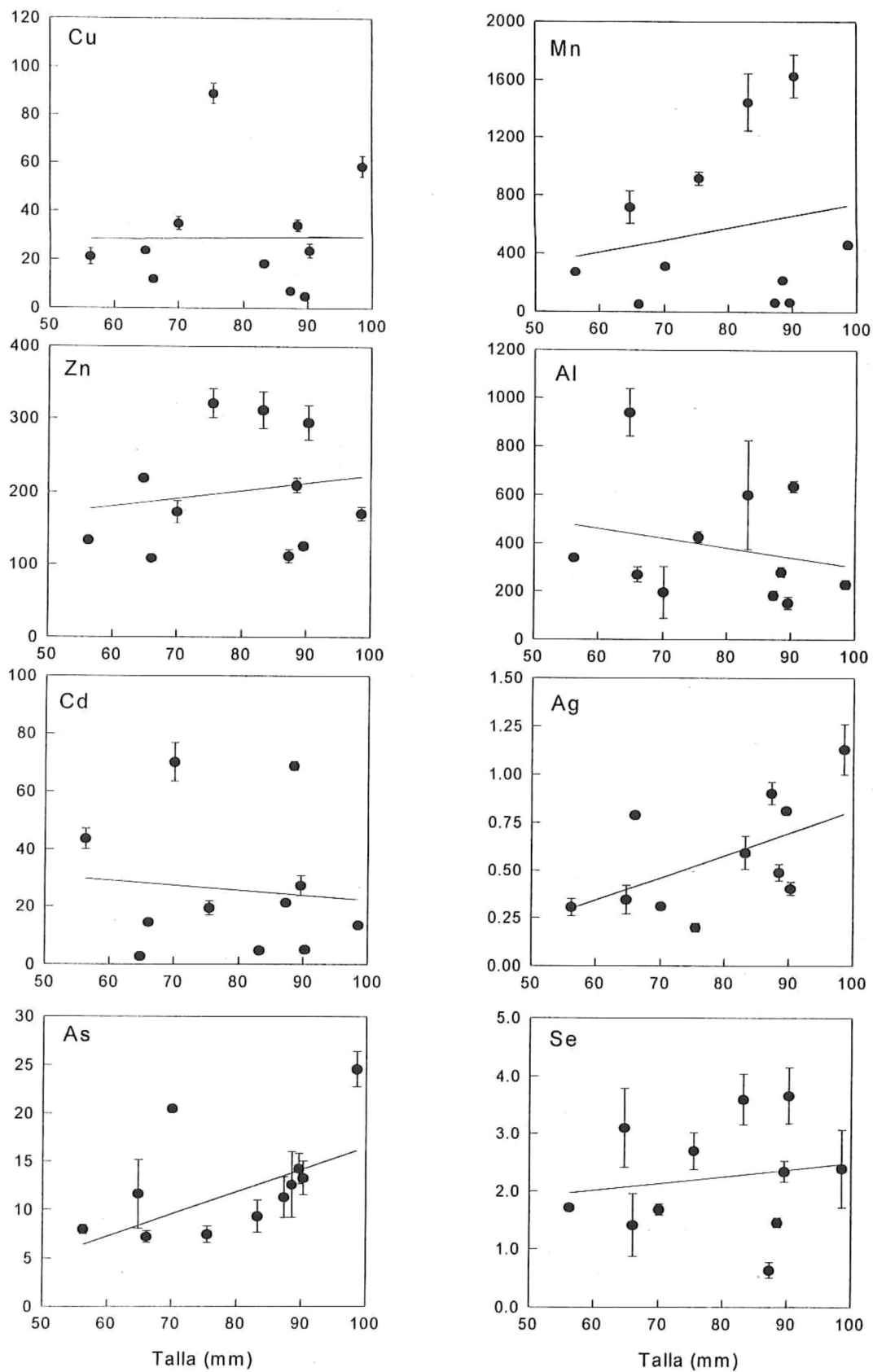


Figura 3. Relación entre la concentración de metales ( $\mu\text{g g}^{-1}$  p.s.) y la talla de los mejillones *Modiolus sp.*

organismos. El Al también presentó una alta variabilidad regional, sin embargo, muestra una tendencia a concentrarse en mejillones de talla chica.

En contraste con los metales pesados mencionados, el As y Ag muestran una tendencia clara a concentrarse en mejillones de talla grande-mediana, independientemente de la localidad de colecta. El Mn también mostró una tendencia a concentrarse en organismos de talla grande-mediana. Sin embargo, este elemento presenta una fuerte influencia de la localidad de muestreo. En estaciones como Bahía de Los Angeles y Bahía Tortugas (Tabla II), donde las concentraciones de Mn en los mejillones son relativamente bajas ( $< 311$  y  $66 \mu\text{g g}^{-1}$  p.s., respectivamente), la variabilidad del Mn parece ser independiente de la talla. En contraste, en localidades como Punta Estrella y Santa Rosalía, donde los niveles de Mn en los mejillones es significativamente mas altos ( $>1600$  y  $460 \mu\text{g g}^{-1}$  p.s., respectivamente), este elemento presenta un relación positiva con respecto a la talla.

#### 4. DISCUSION

Los resultados del presente estudio muestran que la acumulación de metales en los mejillones colectados en el area de estudio se encuentran fuertemente influenciados por la fuentes de aporte. La margen occidental del Golfo de California es una región caracterizada por su escasa actividad antropogénica, por lo que puede considerarse prácticamente libre de contaminación por metales pesados. Sin embargo, la resuspensión de material sedimentario en el extremo norte del Golfo de California, la actividad minera en el área de Santa Rosalía y los procesos de fuerte mezcla por surgencia, han sido reconocidos como las principales fuentes de metales pesados a la región (Da Costa Gomez-Bueno y Valle-Díaz, 1989; Olguin-Espinoza, 1989).

La distribución espacial del Mn, Al y Zn fué muy similar en el área de estudio. Estos elementos mostraron una distribución geografica caracterizada por altos niveles en la parte norte del Golfo de California y, con excepción de Santa Rosalía, niveles relativamente menores en el resto de las localidades de colecta (Fig. 2). Antecedentes de estudio han mostrado la misma covariabilidad de estos metales en moluscos del Alto Golfo de California (Olguín-Espinoza, 1989; Da Costa Gomez-Bueno y Valle-Díaz, 1989). El comportamiento de estos elementos en los mejillones puede ser explicado por un mecanismo de incorporación y acumulación de material particulado sedimentario en el tracto digestivo de los organismos. Se ha demostrado que las variaciones estacionales de aluminio en *M. californianus* se deben a la cantidad de material particulado en el tracto digestivo (Oullete, 1981). Además se ha reconocido que los niveles de Al en los mejillones disminuyen considerablemente después del proceso de depuración (Stephenson *et al.*, 1979). Julshamn (1981) encontró niveles de Mn en *M. modiolus* mas elevados comparado con otros moluscos de la misma localidad. Además, una alta proporción (>90%) de este elemento se concentra en el sistema digestivo.

Se ha propuesto que, en general los metales pesados son transportados por los ríos con una secuencia de concentración promedio de Al>Mn>Zn>Cu>Cd (Martin y Meybeck, 1979). Además, por el carácter litogénico del Al y Mn (Lantzy y Mackenzie, 1979), hace suponer que los mejillones de Punta Estrella se encuentran expuestos al material sedimentario proveniente del delta del Río Colorado.

Esta hipótesis es sustentada por estudios recientes en los que se ha mostrado que la pérdida de la descarga de agua dulce y sedimentos del Río Colorado ha modificado la

circulación en el área del Alto Golfo de California. Esto ha generado un proceso destructivo de la estructura del delta, debido a la resuspensión y erosión de sedimentos en la cuenca deltaica. Los sedimentos resuspendidos son transportados hacia afuera del sistema, dispersando el material particulado de tamaños fino, preferencialmente a lo largo de la costa de Baja California (Carriquiry y Sánchez, 1999). Además, por sus características dinámicas, el delta del Río Colorado no solo es un exportador neto de material sedimentario hacia la costa de Baja California, sino también de los metales pesados asociados a éste. Castro-Castro (1999), encontró que la región del delta funciona como una fuente exportadora de metales asociados al material particulado, encontrando una secuencia de concentración de  $Al > Fe > Mn > Zn > Cu$  en la fracción residual (que corresponde a  $>90\%$  del metal total), similar a lo reportado por Martin y Meybeck (1979).

El Cd en este estudio presentó un comportamiento espacial característico. Este elemento se encontró en concentraciones mayores en aquellos lugares en que los mejillones se encuentran expuestos a regímenes intensos de surgencia y mezcla de la columna de agua.

Se conoce que el Cd muestra un comportamiento biogeoquímico muy similar al de los nutrientes, particularmente con los fosfatos (Boyle *et al.*, 1976; de Baar *et al.*, 1994); y al igual que los fosfatos, el Cd parece ser controlado por el ciclo de la materia orgánica en la columna de agua (Martin *et al.*, 1976). Esta característica hace que las aguas de surgencia se encuentren enriquecidas en Cd y constituyan la principal fuente de este elemento a los organismos expuestas a ellas.

Las mayores concentraciones de Cd ( $27.3 \mu\text{g g}^{-1}$  p.s.) en el interior del Golfo de California se midieron en *M. capax* colectado en Bahía de Los Angeles. Este resultado es muy similar a los niveles máximos reportados para *M. capax* de esta localidad en trabajos anteriores (de  $39.2 \mu\text{g g}^{-1}$  p.s. en Da Costa Gómez-Bueno y Valle-Díaz, 1989), pero más de dos veces mayor a lo reportado en mejillones *M. californianus* colectado en la región noroccidental de Baja California (Lares-Reyes, 1988; Muñoz-Barbosa, 1997). Sin embargo, los niveles más altos de Cd medidos en este estudio ( $70 \mu\text{g g}^{-1}$  p.s., Tabla III) se encontraron en los mejillones *M. modiolus* colectados en Bahía Tortugas en la región del Pacífico de Baja California. Estos niveles de Cd son de los más altos reportados en la literatura y probablemente no sólo reflejen el nivel de exposición, sino también las diferencias en el estado fisiológico y/o tasas metabólicas de las dos especies de mejillones estudiadas. Esta

hipótesis se basa en el hecho de que el mejillón *M. californianus* colectado en la misma localidad y al mismo tiempo presenta concentraciones de Cd mucho mas bajas ( $<10 \mu\text{g g}^{-1}$  p.s.), independientemente de la talla (Fig. 2). Por otro lado, la concentración de Cd en aguas subsuperficiales reportadas para la zona del Pacífico y en el interior del Golfo de California son muy similares (Bruland *et al.*, 1978). Estas diferencias en acumulación de metales entre especies de moluscos ya han sido reportadas. Por ejemplo, Julshman (1981) en un estudio con mejillones colectados en la misma localidad y con el mismo nivel de exposición, encontró que *M. modiolus* acumuló tres veces mas cadmio que *M. edulis*.

La localidad de Santa Rosalía presenta una característica única en el área de estudio. Esta es una de las pocas localidades en los márgenes del Golfo de California donde se ha desarrollado una actividad antropogénica importante frente a la costa de Baja California. Santa Rosalía es conocida por su explotación minera de cobre desde principios de siglo hasta años recientes (Consejo de Recursos Minerales, 1983).

Una de las características sobresalientes de los mejillones colectados en Santa Rosalía, son los altos niveles de Cu en *M. capax* (hasta de  $89 \mu\text{g g}^{-1}$  p.s.), comparados con el resto de las localidades estudiadas (Tabla III, Fig. 2). Resultados similares fueron reportados por Da Costa Gómez-Bueno y Valle-Díaz (1989), comparando un mayor número de localidades en el Golfo de California. Diversos autores han señalado que los moluscos en general y los mejillones en particular no son buenos indicadores de Cu en el medioambiente acuático (Phillips, 1976; Martincic *et al.*, 1987). Las razones que argumentan son la existencia de un mecanismo de regulación metabólica de Cu en estos organismos; aunque el grado de regulación parece depender de varios factores, entre ellos la edad, así como el grado de contaminación a los que los moluscos se encuentran expuestos. Sin embargo, los resultados de este estudio parecen contradecir esta hipótesis. Sin bien los niveles de Cu en los mejillones estudiados son relativamente bajos y no muestran una tendencia espacial clara, las concentraciones de Cu en *M. capax* de Santa Rosalía son cerca de tres veces mayores a los medidos en Bahía Tortugas (de  $34 \mu\text{g g}^{-1}$  p.s., en *M. modiolus*), que corresponde al siguiente valor mas alto medido en este estudio. Una explicación a este comportamiento, es la probable regulación de Cu a bajas concentraciones, pero a niveles relativamente elevados de exposición a este metal, la capacidad de regulación metabólica de los mejillones sea superada e inicie un proceso de acumulación (Amiard-Triquet *et al.*, 1986).

Además de los altos valores de Cu medidos en Santa Rosalía, esta localidad también se destacó por presentar niveles altos para la mayoría de los metales estudiados. Por ejemplo, esta zona presentó el segundo valor más alto medido de Mn (916 y 462  $\mu\text{g g}^{-1}$  p.s.; para talla mediana y grande, respectivamente), Al (426  $\mu\text{g g}^{-1}$  p.s., para talla mediana), Zn (321  $\mu\text{g g}^{-1}$  p.s., en talla mediana) y Se (2.69  $\mu\text{g g}^{-1}$  p.s., en talla mediana). Así como también, en esta localidad se midieron las concentraciones más altas para Ag (1.13  $\mu\text{g g}^{-1}$  p.s., en mejillones de talla grande) y As (24.6  $\mu\text{g g}^{-1}$  p.s., en talla grande). Estos resultados nos indican que la movilización de materiales, producto de la actividad minera de cobre, también es capaz de movilizar al ambiente otros elementos de manera importante.

Los metales Ag, As y Se, presentaron poca variabilidad en los mejillones examinados en las dos áreas de estudio. Además de los resultados indicados para Santa Rosalía, las concentraciones de estos elementos fueron relativamente bajas y probablemente reflejen los niveles naturales para estas regiones y en general para áreas libres de contaminación.

Debido al marcado efecto de la localidad de muestreo sobre los niveles de metales medidos en los mejillones *Modiolus sp*, nuestro análisis solo nos permite obtener una tendencia general del efecto de la talla sobre la acumulación de los elementos cuantificados en este estudio (Fig. 3).

Aún cuando los niveles de metales pesados biodisponibles en el ambiente constituyen la principal causa de variación de metales en los mejillones, otras fuentes de variabilidad incluyen el tamaño, tasa de crecimiento, edad, sexo, variaciones estacionales, condición reproductiva, posición en la columna de agua, salinidad, temperatura e interacción con otros contaminantes en el ambiente (Bayne *et al.*, 1976; Boyden, 1977; Phillips, 1980; Latouche y Mix, 1982; Lobel *et al.*, 1991). Entre estos, probablemente la condición reproductiva es el factor que mayor atención ha recibido, debido al efecto de dilución de metales que muestra el tejido gonadal (Oullete, 1981). De hecho los programas de monitoreo, empleando mejillones como organismos bioindicadores, generalmente se analiza solo el tejido somático, eliminando previamente las gónadas (Stephenson *et al.*, 1979; Lauenstein *et al.*, 1990).

Una parte importante de los estudios relacionados al efecto de la talla de los organismos en la acumulación de metales han sido desarrollados sobre la cinética de acumulación de mercurio. Estos han mostrado una relación positiva de la acumulación de Hg con respecto al tamaño (edad) de los organismos (Phillips, 1980). En contraste, otros metales

generalmente han mostrado un decremento en la concentración con respecto al tamaño (edad) o muestran una independencia del tamaño con respecto a la acumulación de metales (Boyden, 1974, 1977; Latouche y Mix, 1982; Lobel, 1987). Lo anterior parece indicar que otros factores, tales como la biodisponibilidad en cada lugar, la variación estacional y la condición reproductiva juegan un papel mas importante sobre la bioacumulación. En nuestro estudio, solo aquellos elementos que muestran una variabilidad relativamente baja entre localidades, parecen ser afectados por la tamaño de los organismos. Entre, estos la Ag y el As fueron los metales que presentan una relación positiva mas clara con la talla (Fig. 3). Para el resto de los metales estudiados, es evidente que el efecto local es mucho mas importante como fuente de variación de los metales pesados en los organismos.

## 5. CONCLUSIONES

Los resultados indican que la distribución geográfica y la acumulación de Cu, Mn, Zn, Al, Cd, Ag, As y Se en las diferentes tallas de mejillones examinados en el área de estudio se encuentran influenciados por las fuentes de aporte, biodisponibilidad en cada lugar y la condición biológica de los organismos.

Los mejillones presentan niveles de Cu independientes de la talla en las áreas estudiadas a excepción de Santa Rosalía, localidad conocida por la explotación minera de Cu realizada en esta zona.

El Zn, Cd y Se indican una fuerte variabilidad regional y no muestran una tendencia clara respecto a la talla de los organismos.

El Al muestra una alta variabilidad regional con una tendencia a acumularse en organismos de talla chica.

El As y Se se concentran mayormente en mejillones de talla grande-mediana, independiente de la localidad de colecta en las zonas examinadas.

El Mn tiende acumularse en tallas grande-mediana de mejillones mostrando una dependencia de la localidad de colecta.

Comparativamente en Bahía Tortugas, *M. californianus* acumuló en general los metales estudiados en menor cantidad que *M. modiolus* al mismo nivel de exposición. Siendo mas evidente el Cu, Mn y Cd donde los niveles en *M. californianus* corresponden a una tercera parte de los detectados en *M. modiolus*.

En relación a la distribución geográfica de los elementos en el Mar de Cortés, estas fueron similares para el Mn, Al y Zn con mayores concentraciones en la parte norte del Golfo. Este fenómeno probablemente es explicado a que los mejillones se encuentran expuestos a estos metales asociados al material sedimentario resuspendido en el Delta del Río Colorado.

El Cd presentó un comportamiento característico con concentraciones mayores en aquellos lugares en que los mejillones se encuentran expuestos a regimenes intensos de surgencia y mezcla de la columna de agua. En el interior del Golfo las máximas concentraciones de Cd ( $27 \mu\text{g g}^{-1}$  p.s.) se midieron en *M. capax* de Bahía de Los Angeles. Sin embargo, los mas altos niveles de Cd ( $70 \mu\text{g g}^{-1}$  p.s.) se midieron en *M. modiolus* colectados en Bahía Tortugas en la región del Pacífico.

En las zonas examinadas el Cu presentó en lo general niveles relativamente bajos ( $<35 \mu\text{g g}^{-1}$  p.s.) con excepción de Santa Rosalía ( $89 \mu\text{g g}^{-1}$  p.s.). Esta región es conocida por la explotación minera de Cu.

El As, Se y Ag, presentan poca variabilidad en las zonas estudiadas, con niveles bajos que probablemente reflejen los niveles naturales y en general para áreas libres de contaminación.

## 6. LITERATURA CITADA

- Alvarez-Borrego, S. (1983) Gulf of California. En: *Estuaries and Enclosed Seas*. (Ketchum, B.H., ed.). Chp. 17, pp. 427-449. Elsevier Sci., Amsterdam.
- Alvarez-Borrego, S., y Lara-Lara, J.R. (1991). The physical and primary productivity of the Gulf of California. En: *The Gulf and Peninsular Province of the Californias*. (Dauphins, J.P. y Simoneit, B.R., eds.). Chap. 26. American Association of Petroleum Geologist. Memoir 47, Tulsa, OK. pp. 555-568.
- Amiard-Triquet, C., Berthet, B., Metayer, C., y Amiard, J.C. (1986). Contribution to ecotoxicological study of cadmium, cooper and zinc in the mussel *Mytilus edulis*. II. Experimental study. *Mar. Biol.*, 92:7-13
- Bayne, B.L., Bayne, C.J., Carefoot, T.C. y Thompson, R.J. (1976). The physiological ecology of *Mytilus californianus* Conrad. 1. Metabolism and energy balance. *Oecologia*, 22:211-228.
- Boyden, C.R. (1974). Trace elements contents and body size in molluscs. *Nature*, 251:311-314.
- Boyden, C.R. (1977). Effect of size upon metal content of shellfish. *J. Mar. Biol. Ass. U.K.*, 57:675-714.
- Boyle, E.A., Sclater, F. y Edmond, J.M. (1976) On the marine geochemistry of cadmium. *Nature*, 263:42-44.
- Bruland, K.W., Knauer, G.A. y Martin, J.H. (1978). Cadmium in Northeast Pacific waters. *Limnol. Oceanogr.*, 22(4):618-625.
- Carriquiry, J.D. y Sánchez, A. (1999). Sedimentation in the Colorado River delta and Upper Gulf of California after nearly a century of discharge loss. *Mar. Geol.*, (en prensa).
- Castro Castro, P.G. (1999) Flujo de metales en sedimentos en supension en el Delta del Río Colorado. Tesis de Maestría en Ciencias en Oceanografía Costera. FCM-IIO, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, B.C. 90 pp.
- Consejo de Recursos Minerals, (1983). *Anuario Estadístico de la Minería Mexicana*. C.R.M.
- Cossa, D., Bourget, E. y Piuze, J. (1979). Sexual maturation as a source of variation in the relationship between cadmium concentration and body weight of *Mytilus edulis* (L). *Mar. Pollut. Bull.*, 10:174-176.

- Da Costa Gómez-Bueno, C.E. y Valle-Díaz, N. (1989). Disponibilidad biológica de metales pesados en el mejillón *Modiolus capax* del Mar de Cortes. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas. Universidad Autónoma de Baja California. Ensenada, B.C., 77 pp.
- de Baar, H.J.W., Saager, P.M., Nolthing, R.F. y van der Meer, J. (1994) Cadmium versus phosphate in the world ocean. *Mar. Chem.*, 46:261-281.
- De la Lanza-Espino, G. (1991) *Oceanografía de los Mares Mexicanos*. AGT, México, D.F. 569 pp.
- Frazier, J.M., George, S.G., Overnell, J., Coombs, T.L. y Kagi, J. (1985). Characterization of two molecular weight classes of cadmium binding proteins from the mussel, *Mytilus edulis* (L.) *Comp. Biochem. Physiol.*, 80C:257-262.
- Forstner, U. y Wittmann, G.T.W. 1979. *Metal pollution in aquatic environment*. Springer-Verlag, Berlin. 486 pp.
- Garrels, R.M., Mackenzie, F.T., y C. Hunt. 1975. *Chemical cycles and the global environment. Assessing human influences*. William Kaufmann, Inc, Los Altos, California. 206 pp.
- Goldberg, E.D. (1975). The mussel watch - a first step in the global marine monitoring. *Mar. Pollut. Bull.*, 6:111.
- Goldberg, E.D., Koide, M., Hodge, V., Flegal, A.R. y Martin, J. (1978). U.S. Mussel Watch: 1977-1978 results on trace metals and radionuclides. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 16:69-93.
- Gutierrez-Galindo, E.A., Flores-Muñoz G., Villaescusa-Celaya J.A. y Arreola-Chimal, A. 1994. Spatial and Temporal Variations of Arsenic and Selenium in a Biomonitor (*Modiolus capax*) from the Gulf of California. *Mar. Pollut. Bull.*, 28:330-333.
- Julshamn, K. (1981). Studies on major and minor elements in molluscs in western Norway. *Fisk. Dir. Skr. Ser. Emering.*, 1(5):215-234.
- Lantzy, R. y Mackenzie, F.T. (1979). Atmospheric trace metals: Global cycles and assessment of man's impact. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 43:511-525.
- Lares-Reyes, M.L.C. (1988). Variación temporal de cadmio y mercurio biodisponibles en una zona de surgencia costera. Tesis de Maestría en Ecología Marina. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. Ensenada, B.C. 99 pp.

- Latouche, Y.D. y Mix, M.C. (1982). The effect of depuration, size and sex on trace metal levels in bay mussels. *Mar. Pollut. Bull.*, 13(1):27-29.
- Lauenstein, G.G., Robertson, A. y O'Connor, T.P. (1990). Comparison of trace metal data in mussels and oysters from a Mussel Watch Program of the 1970's with those from 1980's program. *Mar. Pollut. Bull.*, 21:440-447.
- Lobel, P.B. y Wright, D.A. (1982). Gonadal and nongonadal zinc concentrations in mussels. *Mar. Pollut. Bull.*, 13:329-323.
- Lobel, P.B. (1987). Short-term and long-term uptake of zinc by the mussel *Mytilus edulis*: A study in individual variability. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.*, 16:723-732.
- Lobel, P.B., Bajdik, C.D., Belkhole, S.P., Jackson, S.E. y Longerich, H.P. (1991). Improved protocol for collecting mussel watch specimens taking into account sex, size, condition, shell shape and chronological age. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.*, 21:409-414.
- Martin, J.H., Bruland, K.W. y Broenkow, W.W. (1976). Cadmium transport in the California Current. En H.L. Windom y R.A. Duce (Eds) Marine pollution transfer. Health, Lexington, MA. Pp 159-197.
- Martin, J.H. y Meybeck, M. (1979). Elemental mass-balance of material carried by major world rivers. *Mar. Chem.*, 7:173-206.
- Martincic, D., Nurnberg, H.W. y Branica, M. (1987). Bioaccumulation of metals by bivalves from the Limski Kanal (North Adriatic Sea) III. Cooper distribution between *Mytilus galoprovincialis* (Lmk), and ambient water. *Sci. Total Environ.*, 60:121-142.
- Muñoz-Barbosa, A. (1997). Variabilidad espacial y temporal de metales pesados en la costa noroccidental de Baja California mediante el uso de *Mytilus californianus* como bioindicador. Tesis de Maestría en Oceanografía Costera. Universidad Autónoma de Baja California. Ensenada, B.C. 106 pp.
- Olguin-Espinoza, G. (1989). Metales traza en moluscos del Valle de Mexicali y el Alto Golfo de California. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas. Universidad Autónoma de Baja California. Ensenada, B.C., 61 pp.
- Orren, M.J., Eagle, G., Henning, H.F.K-O. y Green, A. (1980). Variations in trace metals contents of the mussel *Choromytilus meridionalis* (Kr) with season and sex. *Mar. Pollut. Bull.*, 11:253-257.

- Oullete, T.R. (1981) Seasonal variation of trace-metal in the mussel *Mytilus californianus*. *Environ. Cons.*, 8:53-58.
- Phillips, D.J.H. (1976). The common mussel *Mytilus edulis* as an indicator of pollution by zinc, cadmium, lead and copper. I. Effect of environmental variables on uptake of metals. *Mar. Biol.*, 38:59-69.
- Phillips, D.J.H. (1977). The use of biological indicator organisms to monitor trace metal pollution in the marine environments - a review. *Environm. Pollut.*, 13:281-317.
- Phillips, D.J.H. (1980). *Quantitative Aquatic Biological Indicators*. Applied Sc. Publsh. Ltd., London, U.K., 488 pp.
- Phillips, D.J.H. y D.A. Segar (1986) Use of bio-indicators in monitoring conservative contaminants: Programme design imperatives. *Mar. Pollut. Bull.*, 17(1):10-17.
- Prosi, F. y Goldberg, E.D. (1981). *Metal Pollution in the Aquatic Environment*. Springer-Verlag, New York. 475 pp.
- Segar, D.A., Collins, J.D., y Riley, J.P. (1971). The distribution of major and some minor elements in marine animals. *J. Mar. Biol. Ass. U.K.*, 25:679-688.
- Stephenson, M.D., Martin, M., Lange, S.E., Flegal, A.R. y Martin, J.H. (1979) Trace metal concentration in the california mussel *Mytilus californianus*. *Water Qual. Mon. Rep.*, Vol. III, No. 70-22, 102 pp.
- Van Andel, T.H. (1964). Recent marine sediments of the Gulf of California. In: Van Andel, T.J., Shor, G.G. (Eds). *Marine Geology of the Gulf of California: a Symposium*. Am. Assoc. Pet. Geol. Mem. 3:216-310.