



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Unidad Académica Mazatlán

POSGRADO EN CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA



Elementos traza no esenciales en macroalgas
del Golfo de California

Tesis

Que para obtener el grado de

Maestro en Ciencias

(Química Acuática)

Presenta:

Ing. Siria Antonieta Meraz González

Director de Tesis:

Dr. Martín F. Soto Jiménez

Comité Tutorial:

Dra. Hilda P. León Tejera

Dr. Carlos René Green Ruiz

Dra. Elisa Serviere Zaragoza

Dr. Federico Páez Osuna

Mazatlán, Sinaloa

Enero de 2012



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



Este trabajo se realizó en el laboratorio de Isotopía Estable de la Unidad Académica Mazatlán del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). El estudio se financió con fondos del proyecto PAPIIT (IN 206409): Isótopos estables en biomonitores para el estudio de la contaminación en ecosistemas costeros del Golfo de California, a cargo del Dr. Martín Federico Soto Jiménez.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección:

Siriamerazglez@gmail.com y/o Martín@ola.icmyl.unam.mx

Si el permiso se otorga deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo de la siguiente manera.

Meraz-González S. 2012. Elementos traza no esenciales en macroalgas del Golfo de California. Tesis de Maestría, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM, 156 p.

Dedicatoria

A mi esposo

A mis hijas

A mis padres y hermanas

A mis amigos

A todos los que colaboraron en mi formación para la realización de esta tesis.

"El fracaso no te sobrecogerá nunca si tu determinación para alcanzar el éxito es lo suficientemente poderosa."

Og Mandino

Agradecimientos

A Dios por darme el regalo de la vida, por su amor y enseñanzas que me permiten dirigir mi rumbo.

A José, mi inmensa gratitud por tu gran amor y amistad, que siempre es incondicional, por tu gran optimismo y fortaleza. Gracias por compartir tu vida conmigo.

A mis hijas, Siria Yvette, Jessica Yvonne y Alexa Yvanna, por su alegría, paciencia y comprensión, por enseñarme y motivarme todos los días. Gracias, las amo.

A mi papá, mamá, hermanas y demás familia, que siempre me han motivado y apoyado a seguir adelante aún en los momentos en que deseo flaquear. Gracias por su apoyo.

A mi director de tesis, Dr. Martin Soto, mi completa admiración y agradecimiento, por su gran paciencia, su humildad para siempre compartir su conocimiento y por la constante motivación a seguir adelante.

A mis asesores:

Dr. Federico Paéz, por su gran colaboración a mi proyecto, por sus enseñanzas y su ejemplo de trabajo.

Dr. Carlos Green, por sus comentarios y sugerencias a este trabajo, por su alegría y entusiasmo hacia todo lo que realiza.

Dra. Elisa Serviere, por su gran contribución a este trabajo, gracias por sus valiosos comentarios, fueron de gran ayuda para mi.

Dra. Hilda León, por sus comentarios, sugerencias, su disponibilidad a enseñar y ayudar en la elaboración de este trabajo.

A mis compañeros de laboratorio y grandes amigos, por su paciencia y enseñanzas, por su amistad y disponibilidad: Vicente, Julia, Jesús, Elsa, Daniel y Arcelia.

A M.C. Julia Ochoa, por la recolecta e identificación de muestras para la realización de este trabajo.

A Ana Lilia Zapata, por sus enseñanzas en la digestión de muestras.

Al Quim. Humberto Bojorquez, por su colaboración en la utilización del equipo de laboratorio para la realización de análisis, y por sus comentarios siempre motivantes.

A Clara Ramírez, responsable de la Biblioteca Regional "María Elena Caso" de la Unidad Académica Mazatlán por su disponibilidad y apoyo en la recopilación bibliográfica.

A Margarita Cordero, por su apoyo en lo relacionado a los aspectos administrativos.

A Germán Ramírez, Carlos Suarez y Herlinda Virgen, por su ayuda en video conferencias y apoyo técnico en lo relativo a computación e informática.

A todo el personal del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Unidad Académica Mazatlan, por su colaboración y facilidades para realizar el trabajo.

Al CONACYT por el apoyo otorgado durante la realización de mi tesis.

A mis amigos y compañeros: Susy, Perla, Jeannete, Carolina, Daniela, Judith, Yazmin, Bibiana, Claudia, Marce, Cristina, Magda, Adriana, Víctor, Gladys, Roberto, Rigo, Karen, Raúl y Segir, por compartir conmigo este proceso y hacer mi estancia tan agradable.

A todos mis amigos, que sin compartir su estancia aquí, siempre estuvieron conmigo apoyando y compartiendo su amistad.

Para todos los que de alguna manera participaron en mi formación, muchas gracias.

ÍNDICE

	Página
Resumen.....	iii
Abstrac.....	v
1. Introducción.....	1
1.1. Las macroalgas como biomonitores.....	1
1.2. Generalidades de los elementos traza.....	3
2. Antecedentes.....	5
3. Hipótesis.....	9
4. Objetivo General.....	10
4.1. Objetivos particulares.....	10
5. Área de Estudio	11
5.1. Regionalización del Golfo de California.....	12
5.2. Región 1. Baja California.....	13
5.3. Región 2. Norte de Sonora.....	15
5.4. Región 3. Baja California Sur.....	15
5.5. Región 4. Sur de Sonora y Sinaloa.....	17
6. Sitio de muestreo.....	19
7. Metodología.....	23
7.1. Recoleccion y preparación de muestras.....	23
7.2. Identificación de muestras	24
7.3. Análisis de muestras	24
7.4. Análisis estadísticos de datos.....	26
8. Resultados	27

8.1. Hg en macroalgas del Golfo de California.....	27
8.2. Cd en macroalgas del Golfo deCalifornia.....	32
8.3. As en macroalgas del Golfo de California.....	35
8.4. Comparativo por regiones del Golfo de California.....	39
8.4.1. Región 1.....	39
8.4.2. Región 2.....	40
8.4.3. Región 3.....	42
8.4.4. Región 4.....	43
8.5. Comparativos entre especímenes de diferentes especies recolectados en un mismo sitio	44
8.6. Comparativos entre especímenes de mismas especies recolectadas en diferentes sitio	49
8.7. Metales en las lagunas costeras de Sinaloa.....	59
8.7.1. Variabilidad temporal del Hg y Cd en las lagunas costeras de Sinaloa: secas vs lluvias.....	62
8.8. Hg y Cd en macroalgas del Estero de Urias.....	65
8.8.1. Variabilidad espacial en las concentraciones de Hg y Cd en macroalgas del Estero de Urias y sus fuentes potenciales.....	71
8.8.2. Variabilidad temporal del Hg y Cd en macroalgas en función de las épocas climáticas.....	73
8.8.3. Variabilidad del Hg y Cd en macroalgas en función de los ambientes dominantes.....	75

8.8.4. Variación espacial de Hg y Cd en especies representativas del Estero de Urias.....	77
8.8.5. Variación temporal de Hg y Cd en especies representativas del Estero de Urias.....	84
9. Discusión.....	94
9.1. Hg en el Golfo de California.....	94
9.2. Cd en el Golfo de California.....	95
9.3. As en el Golfo de California.....	96
9.4. Lagunas costeras del Estado de Sinaloa.....	97
9.5. Estero de Urias	98
9.6. Metales en macroalgas del Golfo y su relación con las fuentes identificadas.....	100
9.6.1. Fuentes de metales en el Golfo de California.....	101
9.6.1.1. Surgencias y actividad hidrotermal.....	101
9.6.1.2. Agricultura.....	104
9.6.1.3. Desarrollos urbanos.....	108
9.6.1.4. Actividad industrial y quema de combustibles fósiles.....	111
9.6.1.5. Actividad minera.....	115
9.7. Composición, morfología y fisiología de las macroalgas en la captación de elementos trazas.....	118
10. Conclusiones.....	123
11. Bibliografía.....	127

ÍNDICE DE FIGURAS

Página

Figura 1. Niveles de Hg, Cd y As, en macroalgas alrededor del mundo.....	6
Figura 2. Mapa de localización de actividades mineras, agrícolas y surgencias del Golfo de California.....	7
Figura 3. Regionalización y estaciones del Golfo de California trabajadas en este estudio.....	13
Figura 4. Región 1 del Golfo de California.....	14
Figura 5. Región 2 del Golfo de California.....	16
Figura 6. Región 3 del Golfo de California.....	17
Figura 7. Región 4 del Golfo de California.....	19
Figura 8. Lagunas costeras del estado de Sinaloa en las que recolectaron macroalgas en dos épocas climáticas.....	21
Figura 9. Estaciones establecidas en el Estero de Urias para el muestreo mensual de macroalgas.....	22
Figura 10. Frecuencia de concentración de mercurio en macroalgas recolectadas en la zona costera del Golfo de California. L.D.= 0.006 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco	28
Figura 11. Número de especímenes analizados de acuerdo al rango de concentración de Cd en $\mu\text{g g}^{-1}$. L.D. = 0.002 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco.....	33
Figura 12. Número de especímenes analizados de acuerdo al rango de concentración de As en $\mu\text{g g}^{-1}$. LD=3.35 \pm 0.13 $\mu\text{g g}^{-1}$ de	

peso seco	36
Figura 13. Comparación de especímenes de diferentes géneros y/o especies recolectadas en (A) Loreto, B.C.S. (GC 77) y (B) Mazatlán, Sinaloa (GC-92-97).....	46
Figura 14. Concentración de Cd ($\mu\text{g g}^{-1}$, peso seco), para diferentes géneros de macroalgas recolectadas en un mismo sitio (San Bruno, GC-81) y su valor máximo de absorción (q_{max}) para especies del mismo género.....	47
Figura 15. Concentración de Hg, Cd y As ($\mu\text{g g}^{-1}$, peso seco), para diferentes especies de macroalgas, recolectadas en un mismo sitio (El Huerfanito-el Bufo).....	48
Figura 16. Concentración de As ($\mu\text{g g}^{-1}$, peso seco), para los especímenes recolectados en las costas del Golfo de California.....	50
Figura 17. Concentración de Cd ($\mu\text{g g}^{-1}$, peso seco), para los especímenes recolectados en las costas del Golfo de California	51
Figura 18. Concentración de Hg ($\mu\text{g g}^{-1}$, peso seco), para los especímenes recolectados en las costas del Golfo de California	53
Figura 19. Concentración de As ($\mu\text{g g}^{-1}$, peso seco), en las diferentes latitudes de las costas de BC, para los géneros	

<i>Colpomenia</i> y <i>Sargassum</i>	54
Figura 20. Concentración de Cd ($\mu\text{g g}^{-1}$, peso seco), en las diferentes latitudes de las costas de BC, para los géneros <i>Colpomenia</i> y <i>Sargassum</i>	55
Figura 21. Concentración de Hg ($\mu\text{g g}^{-1}$, peso seco), en las diferentes latitudes de las costas de BC, para los géneros <i>Colpomenia</i> y <i>Sargassum</i>	56
Figura 22. Concentración de Hg, Cd y As ($\mu\text{g g}^{-1}$, peso seco), en especímenes del género <i>Ulva</i> y la especie <i>U. lactuca</i> en la península de Baja California.....	58
Figura 23. Concentración de Hg, Cd y As ($\mu\text{g g}^{-1}$, peso seco), en especímenes del género <i>Ulva</i> y la especie <i>U. lactuca</i> en las costas de Sonora y Sinaloa.....	59
Figura 24. Número de especímenes analizados de acuerdo al rango de concentración de Hg en $\mu\text{g g}^{-1}$ para las lagunas costeras de Sinaloa. LD=0.006 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco.....	60
Figura 25. Número de especímenes analizados de acuerdo al rango de concentración de Cd en $\mu\text{g g}^{-1}$ para las lagunas costeras de Sinaloa. LD= 0.002 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco.....	61
Figura 26. Concentración de Hg ($\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) para las diferentes épocas de las especies <i>Caulerpa sertularioides</i> y <i>Gracilaria vermiculophylla</i> en las lagunas costeras de Sinaloa.....	63

Figura 27. Concentración de Cd ($\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) para la diferentes épocas de las especies <i>Caulerpa sertularioides</i> y <i>Gracilaria vermiculophylla</i> en las lagunas costeras de Sinaloa.....	64
Figura 28. Número de especímenes analizados de acuerdo al rango de concentración de Hg en $\mu\text{g g}^{-1}$ para el Estero de Urias. LD=0.006 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco	66
Figura 29. Concentración de Hg ($\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) anómalos y extremos, de cada división de las macroalgas del Estero de Urias.....	67
Figura 30. Número de especímenes analizados de acuerdo al rango de concentración de Cd en $\mu\text{g g}^{-1}$ para el Estero de Urias. LD=0.002 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco.....	68
Figura 31. Concentración de Cd ($\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) anómala y extrema, de cada división de las macroalgas del Estero de Urias.....	69
Figura 32. Fuentes y/o condiciones encontradas en los sitios de muestreo y concentraciones de Hg (a) y Cd (b) promediadas a lo largo del año en macroalgas recolectadas en cada zona.....	72
Figura 33. Concentraciones de Hg y Cd en macroalgas recolectadas en el Estero de Urias en tres épocas climáticas contrastantes.....	74

Figura 34. Concentraciones de Hg y Cd en macroalgas recolectadas en el Estero de Urias en tres ambientes representativos.....	76
Figura 35. Concentraciones de Hg y Cd en macroalgas recolectadas en las diferentes estaciones localizadas en el Estero de Urias.....	78
Figura 36. Concentraciones de Hg y Cd en macroalgas del género <i>Ulva</i> recolectadas en las diferentes estaciones localizadas en el Estero de Urias.....	79
Figura 37. Concentración de Hg y Cd ($\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) anual de <i>Ulva intestinalis</i> en función de su distancia.....	81
Figura 38. Concentración de Hg y Cd ($\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) anual de <i>Gracilaria vermiculophylla</i> en función de su distancia.....	83
Figura 39. Concentración de Hg y Cd ($\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco), durante la época de lluvias, para los diferentes ambientes de las macroalgas del Estero de Urias.....	85
Figura 40. Concentración de Hg y Cd ($\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco), durante la época de secas cálidas, para los diferentes ambientes de las macroalgas del Estero de Urias.....	86
Figura 41. Concentración de Hg y Cd ($\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco), durante la época de secas frías, para los diferentes ambientes de las macroalgas del Estero de Urias.....	87
Figura 42. Comparativo de las concentraciones de Hg (a) y Cd (b) en macroalgas del género <i>Ulva</i> recolectadas en el Estero de	

Urias en Febrero del 2009 y Febrero del 2010.....	88
Figura 43. Comparativo de las concentraciones de Hg (a) y Cd (b) en macroalgas del género <i>Ulva</i> recolectadas en el Estero de Urias durante el periodo de muestreo (Febrero-2009 a marzo-2010).....	90
Figura 44. Comparativo de las concentraciones de (a) Hg y (b) Cd ($\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) de la especie <i>U. intestinalis</i> recolectadas en el Estero de Urias durante el periodo de muestreo (Febrero-2009 a marzo-2010).....	91
Figura 45. Comparativo de las concentraciones de (a) Hg y (b) Cd ($\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) de la especie <i>G. vermiculophylla</i> recolectadas en el Estero de Urias durante todo el periodo de muestreo (Febrero-2009 a marzo-2010).....	93

ÍNDICE DE TABLAS

Página

Tabla 1. Valores de referencia (promedio \pm DE) estimados para Hg, Cd y As en macroalgas recolectadas en el Golfo de California para las tres divisiones ($\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco).....	28
Tabla 2. Comparación de Hg, Cd y As ($\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) entre las diferentes regiones. Pruebas realizadas: *Kruskall Wallis y ** Dunn.....	30
Tabla 3. Comparación de promedios de Hg ($\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) y medianas entre las diferentes regiones de cada una de las divisiones.Pruebas realizadas: *Kruskall Wallis y ** Dunn...	31
Tabla 4. Comparación de promedios de Cd ($\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) y medianas entre las diferentes regiones de cada una de las divisiones. Pruebas realizadas:*Kruskall Wallis y ** Dunn.....	34
Tabla 5. Comparación de promedios de As ($\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) y medianas entre las diferentes regiones de cada una de las divisiones. Pruebas realizadas: *Kruskall Wallis y ** Dunn....	37
Tabla 6. Resultados de concentración máxima y mínima de Hg, Cd y As ($\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco), por regiones y especies.....	38
Tabla 7. Promedio \pm DE, mediana (percentiles 25-75%) por división de las macroalgas del Estero de Urias colectadas desde Febrero-09 a Marzo-10.....	70

ÍNDICE DE ANEXOS

Página

Anexo 1. Concentración promedio ($\mu\text{g g}^{-1}$ en peso seco) de Hg, Cd y As en macroalgas de diferentes zonas geográficas.....	137
Anexo 2. Concentración promedio ($\mu\text{g g}^{-1}$ en peso seco) de Hg, Cd y As en macroalgas de diferentes puntos del golfo de California.....	143
Anexo 3. Ubicación por estaciones de las diferentes especies recolectada en las regiones del Golfo de California.....	147
Anexo 4. Concentración de Hg, Cd y As ($\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) de macroalgas recolectadas en el Golfo de California, durante marzo del 2008 y 2009.....	153
Anexo 5. Concentración de Hg, Cd y As ($\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) de macroalgas recolectadas en las lagunas costeras de Sinaloa en temporada de secas y lluvias.....	155
Anexo 6. Concentración de Hg y Cd ($\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) de macroalgas recolectadas en el Estero de Urias, durante marzo del 2009-marzo del 2010.....	156

RESUMEN

Diversas actividades humanas como la agricultura, ganadería e industria alrededor del Golfo de California (GC), aunadas a las fuentes naturales, como son las surgencias y las ventilas hidrotermales, han aportado diferentes metales (Hg, Cd, entre otros) y metaloides (ejem. As) a la zona costera del GC. Considerando la importancia ecológica y económica de esta ecoregión, se realizó un estudio prospectivo para diagnosticar la contaminación por Hg, Cd y As en las aguas del GC mediante el uso de macroalgas. Se estableció una red de 155 estaciones a lo largo de la zona costera para la recolecta de cerca de 820 especímenes de diferentes especies en la época de primavera. Además se monitorearon seis lagunas costeras de Sinaloa durante las épocas climáticas contrastantes de lluvias y secas (n=126) y de estas se seleccionó el Estero de Urias, un ecosistema antropogénicamente alterado, en el cual se estudió la variabilidad espacial (20 estaciones) y temporal (muestreo mensuales por un año) del Cd y Hg (n=441). Se encontró una gran diversidad de especies representativas de los tres taxones, predominando en abundancia las macroalgas feofitas y en variedad las rodofitas en las costas del GC, y dentro de las lagunas costeras, predominaron especímenes de la división clorofita. El contenido de Hg promedió $0.21 \pm 0.58 \mu\text{g g}^{-1}$, variando desde <LD hasta $6.61 \mu\text{g g}^{-1}$ (e.g. Bahía de la Paz); la concentración de Cd promedió $2.31 \pm 1.96 \mu\text{g g}^{-1}$ con valores de $0.01\text{-}15.83 \mu\text{g g}^{-1}$, encontrándose los valores más altos en la parte central del GC; el contenido de As promedió $4.39 \pm 3.75 \mu\text{g g}^{-1}$ con valores desde $0.17 \mu\text{g g}^{-1}$ hasta $80.04 \mu\text{g g}^{-1}$ (e.g. Agiabampo, Son.). Las concentraciones de referencia para cada metal fueron: Hg= $0.055 \pm 0.03 \mu\text{g g}^{-1}$, Cd= $0.05 \pm 0.03 \mu\text{g g}^{-1}$ y As= $3.35 \pm 0.13 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco. Para el Cd y el As los

especímenes de la división feofita presentaron los valores más altos; para el Hg no se observaron diferencias entre divisiones. En general no hubo diferencias entre géneros y especies muestreadas en un mismo sitio, pero si entre especímenes recolectados en sitios expuestos a diferentes concentraciones ambientales. En las lagunas costeras, la concentración de Hg no presentó diferencias significativas entre las dos épocas climáticas, promediando $0.08 \pm 0.03 \mu\text{g g}^{-1}$ con un máximo de $0.81 \mu\text{g g}^{-1}$ en Santa María La Reforma. El contenido de Cd promedió $1.33 \pm 1.64 \mu\text{g g}^{-1}$ con un máximo de $10.88 \mu\text{g g}^{-1}$ en la Bahía de Navachiste en la temporada de secas. Dentro del Estero de Urias, el Hg promedió de $0.24 \pm 0.49 \mu\text{g g}^{-1}$ ($0.01-5.46 \mu\text{g g}^{-1}$), y para Cd fue de $0.35 \pm 0.57 \mu\text{g g}^{-1}$ ($0.01-6.38 \mu\text{g g}^{-1}$). Las concentraciones mas elevadas de Hg se presentaron en estaciones localizadas en la zona industrial y con influencia urbano-agrícola, mientras que las de Cd se observaron en la zona con influencia urbana y en la zona oceánica adyacente (marina).

ABSTRACT

Various human activities such as agriculture, livestock and industry around the Gulf of California (GC), in addition to natural sources, such as springs and hydrothermal vents, have released different metals and metalloids to the coastal zone of the GC. Considering the ecological and economic importance of this ecoregion, a prospective study was performed to assess the pollution Hg, Cd and As in the waters of the GC using macroalgae as biomonitors. A network of 155 sampling sites along the coastal zone was established for the collection of specimens of different species in springtime (n=820). Six coastal lagoons of Sinaloa were also monitored during both contrasting climatic seasons, rainy and dry seasons (n = 126). Besides, we selected the Estero de Urias, an anthropogenically altered ecosystem, to study the spatial (20 sites) and temporal (monthly during a year) variability of Cd and Hg (n = 441). We found a great diversity of species representing the three taxa, predominantly Phaeophyta seaweeds and a variety of Rhodophyta in the coasts of GC; while in coastal lagoons specimens from the division Chlorophyta dominated. The average of Hg content was $0.21 \pm 0.58 \mu\text{g g}^{-1}$ dry weight, ranging from <DL to $6.61 \mu\text{g g}^{-1}$ (e.g. Bay of La Paz). Cd concentration averaged $2.31 \pm 1.96 \mu\text{g g}^{-1}$ ranging $0.01\text{--}15.83 \mu\text{g g}^{-1}$, the highest values were found in the central part of the GC; As content averaged $4.39 \pm 3.75 \mu\text{g g}^{-1}$, with values from 0.17 to $80.04 \mu\text{g g}^{-1}$ (e.g. Agiabampo, Son.). Baseline concentrations for each metal were: Hg = 0.055 ± 0.03 , Cd = 0.05 ± 0.03 and As = $3.35 \pm 0.13 \mu\text{g g}^{-1}$. Specimens from division Phaeophyta averaged the highest concentrations of Hg compared to the other divisions. Overall there were no differences between genus and species collected in the same

site, but we found differences between genus and species collected at different sites exposed to different environmental concentrations. In coastal lagoons, Hg concentration showed no significant differences between the two climatic seasons, averaging $0.08 \pm 0.03 \mu\text{g g}^{-1}$ with a maximum of $0.81 \mu\text{g g}^{-1}$ in Santa Maria La Reforma. Cd content averaged $1.33 \pm 1.64 \mu\text{g g}^{-1}$ with a maximum of 10.88 in Navachiste Bay during the dry season. Hg level into the Estero de Urias averaged $0.24 \pm 0.49 \mu\text{g g}^{-1}$ (0.01 - $5.46 \mu\text{g g}^{-1}$), and Cd $0.35 \pm 0.57 \mu\text{g g}^{-1}$ (0.01 - $6.38 \mu\text{g g}^{-1}$). Highest concentrations of Hg were observed in determined specimens collected at industrial and urban- agriculture zones, while those of Cd were presented in organism collected in the sites with urban influence and in the adjacent oceanic zone.

1. Introducción

1.1. Las macroalgas como biomonitores

Uno de los principales problemas con la adecuada evaluación de las contribuciones antropogénicas y naturales de elementos traza en el agua de mar, es su inherente variabilidad en la concentración producida por el continuo cambio en las condiciones ambientales de las costas y por las dificultades técnicas en su análisis debido a sus muy bajas concentraciones (De León-Chavira et al., 2002; Huerta-Díaz et al., 2007). De tales inconvenientes, surge la necesidad de usar organismos biomonitores que registren e integren la variabilidad de los metales traza en los ecosistemas marinos y, que a su vez, estos metales se acumulen hasta alcanzar concentraciones que puedan ser analíticamente determinados.

Los organismos más comúnmente utilizados como biomonitores son los moluscos bivalvos, los cuales incorporan metales asociados con la filtración e ingesta de organismos microscópicos y detritus, que constituyen su alimento, (Struck et al., 1997; Páez-Osuna et al., 2000). Pero éstos no reflejan la fracción disuelta del metal presente en la columna de agua. Una práctica alternativa es el uso de macroalgas como organismos biomonitores para evaluar los niveles de concentración de elementos traza disueltos en el agua de mar. Las macroalgas asimilan nutrientes y elementos traza a través de las capas superficiales de su estructura. Las macroalgas concentran iones metálicos del agua de mar, y su variación generalmente refleja la concentración de dichos metales en sus aguas circundantes. Con base en esto las macroalgas han

sido frecuentemente utilizadas como biomonitores de contaminación de elementos traza.

Una de las principales ventajas de analizar metales en macroalgas es que la concentración del metal en el tejido es proporcional solo a la fracción disuelta en las aguas circundantes a estos organismos (Bryan y Hummerstone, 1973; Seeliger y Edwards, 1977). Las macroalgas tienen la capacidad de acumular elementos traza en concentraciones que generalmente son algunos órdenes de magnitud mayores a sus respectivas concentraciones en el agua de mar (Bryan y Langston, 1992; Sánchez-Rodríguez et al., 2001). Las macroalgas cumplen con muchos de los requerimientos básicos de un biomonitor (Rainbow y Philips, 1993), ya que son sésiles, fáciles de coleccionar e identificar, acumulan metales y son tolerantes a ellos, resisten los estudios de laboratorio, se encuentran ampliamente distribuidas y disponibles aun en áreas altamente contaminadas, y son relativamente fáciles de procesar y analizar.

A pesar de todos los atributos descritos, las macroalgas presentan también algunos inconvenientes como biomonitores. Entre sus desventajas se debe resaltar que los factores ambientales que alteran su crecimiento (p. ej. color de la luz, tiempo de iluminación, temperatura, salinidad, disponibilidad de nutrientes, etc.) también tienen un efecto sobre la capacidad para acumulación de metales en las macroalgas. Otro problema es la contaminación por otras formas de vida y partículas finas adheridas a la superficie de las macroalgas (Phillips, 1990), principalmente epibiontes y sedimentos. Aún así, exceptuando estos problemas, el uso de las macroalgas como biomonitor constituye la mejor opción cuando se requiere un estudio de contaminación de metal disuelto biodisponible en un medio acuático.

1.2. Generalidades de los elementos traza.

Desde el punto de vista de la contaminación ambiental, los elementos traza u oligoelementos pueden ser clasificados en tres grupos: (1) no críticos, (2) tóxicos pero muy poco solubles o muy raros y (3) muy tóxicos y relativamente disponibles (Wood, 1974). Sin embargo, algunos elementos de la categoría 3, como el Mn, Fe, Cu y Zn, son micronutrientes esenciales y frecuentemente son denominados oligoelementos. Los oligoelementos son esenciales para los seres vivos a bajas concentraciones, pero una concentración por encima de su nivel característico puede ser perjudicial para los organismos. Ellos pueden limitar el crecimiento de las macroalgas si sus concentraciones son bajas, pero también pueden ser tóxicos a grandes concentraciones. Otros elementos traza en categoría (3), incluyen al As, Cd y Hg que no tienen una función biológica conocida, y que por tanto, no son requeridos para el crecimiento de las macroalgas, y pueden llegar a ser tóxicos aún a bajas concentraciones. Estos últimos son objeto de estudio en esta investigación.

Los elementos traza no esenciales que se encuentran en minerales o rocas son generalmente inofensivos para la biota, llegando a ser potencialmente tóxicos solo cuando se encuentran disueltos en agua. Estos elementos pueden entrar al ambiente en forma natural por intemperismo, lixiviación de suelos, vegetación y por actividad volcánica. Las actividades antropogénicas que contribuyen con elementos traza al ambiente son la extracción y fundición de metales, quema de combustibles fósiles, la agricultura intensiva, la generación de basura industrial y doméstica, y múltiples procesos de manufacturación. Por ejemplo, la mayoría del Hg, Cd y As atmosféricos

son liberados por actividades humanas a través de la quema de productos fósiles, minería, fundiciones y combustión de residuos sólidos. Algunas formas de actividades humanas los liberan directamente al suelo o al agua; por ejemplo, la aplicación de fertilizantes en la agricultura y los vertidos de aguas residuales industriales. Un estudio que procure la evaluación de contaminación marina, debe preferentemente hacer una distinción entre las fuentes de origen natural y de las actividades antropogénicas.

En este estudio se realizó dos muestreos intensivos a lo largo de las costas del Golfo de California para conocer cuales son los sitios que se encuentran enriquecidos con los elementos traza (Hg, Cd y As) utilizando a las macroalgas como bioindicadores. Considerando que las concentraciones de estos elementos pueden verse afectadas principalmente por los aportes diferenciados en las épocas climática contrastantes de la región, que son lluvias y secas, se realizó un muestreo más intensivo en ecosistemas selectos de las costas de Sinaloa, cubriendo ambas épocas climáticas. Asimismo, para hacer una mayor aproximación en la variabilidad inherente en el contenido de los elementos en estudio, debido a cambios relacionados con las macroalgas, con las fuentes y/o con las condiciones ambientales, se realizó una colecta mensual durante un año en estaciones localizadas en el estero de Urias.

2. Antecedentes

Existe una gran cantidad de estudios que revelan la contaminación en ambientes costeros alrededor del mundo (Figura 1), principalmente relacionados con la presencia de elementos traza empleando a las macroalgas como biomonitores (Anexo I). En muchas costas del mundo se encuentran sitios altamente impactados por la presencia de elementos traza, relacionados con actividades antropogénicas. Algunos estudios han sido realizados en las costas de México, y en particular, en ecosistemas costeros del Golfo de California (Anexo 2).

En las costas del Golfo de California y en sus cuencas de captación se realizan múltiples actividades antropogénicas, tales como desarrollos urbanos y turismo, producción de alimentos (pesca, agricultura, ganadería, acuicultura), actividades portuarias, extracción de minerales, transporte marítimo, generación de energía y actividades industriales principalmente relacionadas con la agroindustria. Los puertos más importantes son San Felipe, Santa Rosalía, La Paz y San José del Cabo en la península de Baja California, y Puerto Peñasco, Guaymas, Topolobampo y Mazatlán en Sonora y Sinaloa. En el Golfo de California se han detectado problemas prioritarios relacionados con la contaminación producida por las principales actividades económicas de la región, así como de aportes naturales como las surgencias. (Figura 2).

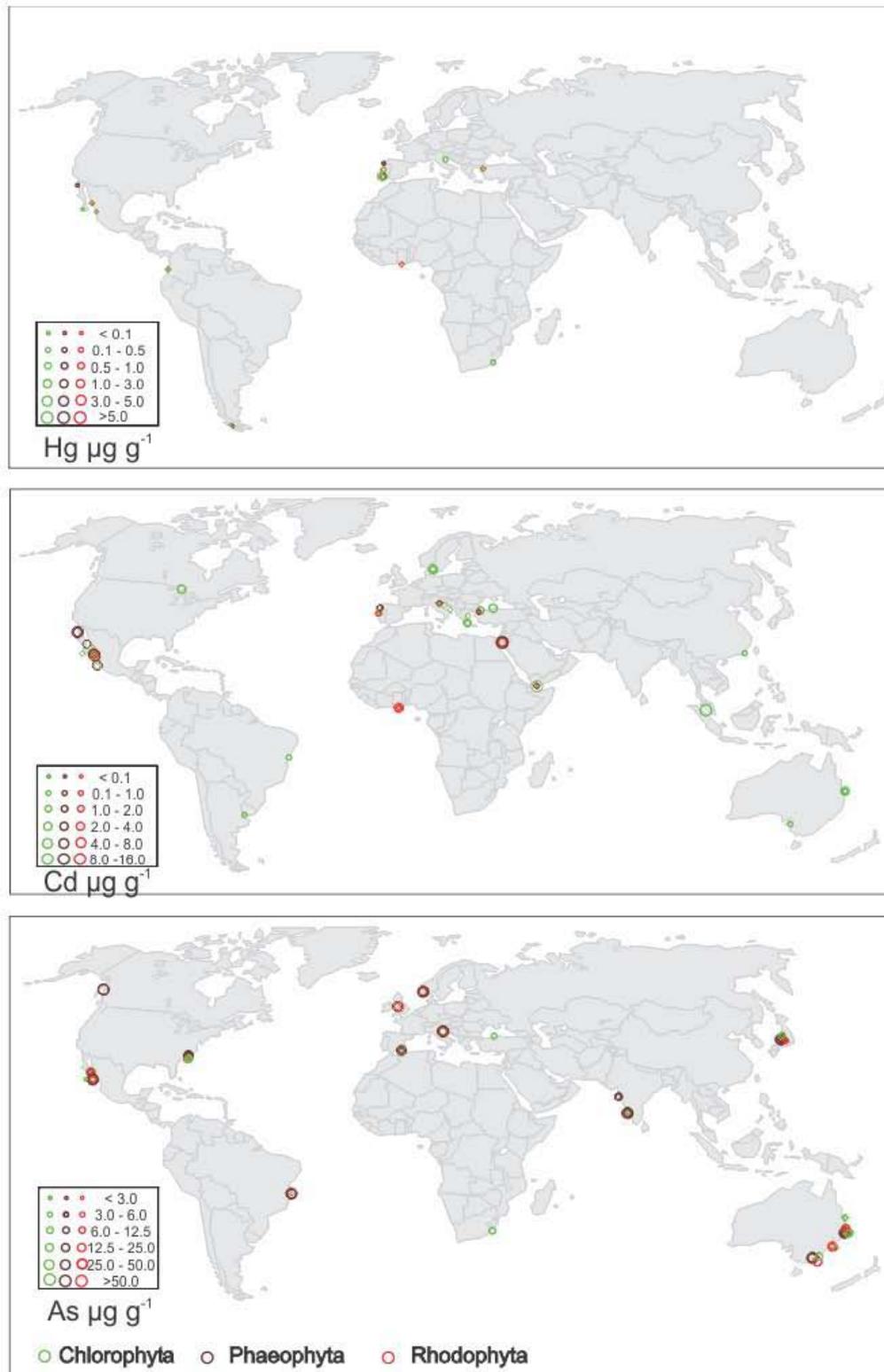


Figura 1. Niveles de Hg, Cd y As, en macroalgas alrededor del mundo. Citas Anexo 1.

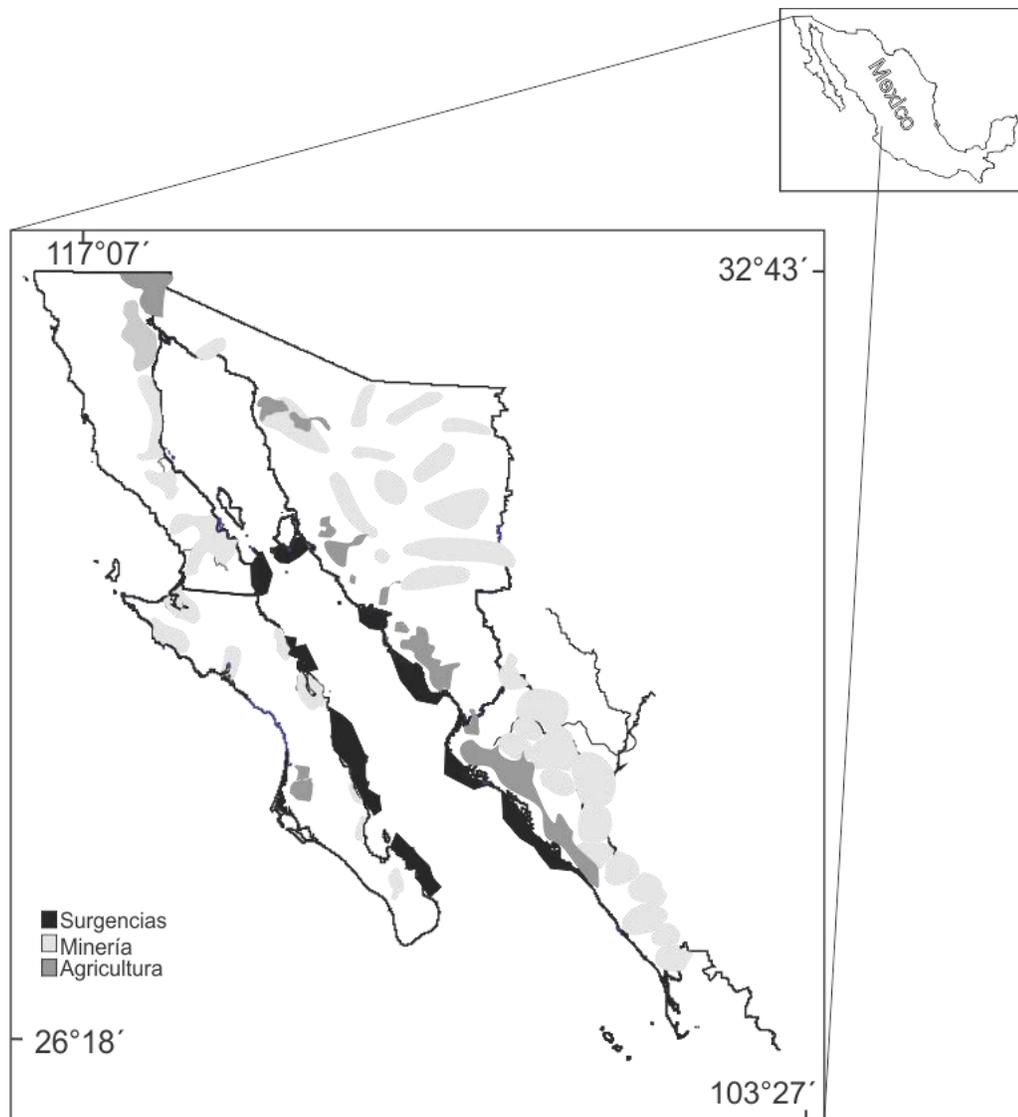


Figura 2. Mapa de localización de actividades mineras, agrícolas y surgencias del Golfo de California (Roden y Groves, 1959).

En las últimas décadas, los ecosistemas marinos asociados al Golfo de California y/o a sus cuencas se han utilizado para diversas actividades antropogénicas. Los ecosistemas costeros del Golfo de California con zonas urbanas y suburbanas y con actividades intensas como la agricultura y actividad industrial se han convertido en depósitos para diversos contaminantes, como plaguicidas, nutrientes y metales. Esto

ha sido revelado por el uso de macroalgas como biomonitores de la contaminación realizados en ecosistemas costeros del Golfo de California (Anexo 2). En estos estudios se encontró que la composición de elementos traza en macroalgas varía de acuerdo a las diferentes especies, sugiriendo que las características de las algas tales como la morfología y ciclos de vida pueden influenciar en la acumulación de metales. Sin embargo, el principal factor controlador de la acumulación de metales en la macroalga es la concentración de los elementos traza disueltos en agua de mar. Esta concentración a su vez es afectada por la presencia de fuentes puntuales y difusas, por variables fisicoquímicas del agua de mar, por procesos de asimilación biológica, captura por materia particulada, acumulación y/o resuspensión de sedimentos, la advección y mezclado de las masas de agua, transporte eólico del material terrestre, etc.

Las principales fuentes de elementos traza identificadas en la región son: para el Cd, una fuente natural asociada a surgencias regionales dentro del Golfo (Delgadillo-Hinojosa et al., 2001), además de fuentes antropogénicas relacionadas con la agricultura y actividades navieras e industriales (Soto-Jiménez y Páez-Osuna, 2001). Para el caso de Hg, la principal fuente ha sido relacionada con la producción de energía eléctrica basada en la quema de combustibles remanentes de la destilación del petróleo (Jara-Marini et al., 2011). Para el caso del As, la procedencia está principalmente asociada a la minería, agricultura y a la crianza de aves y cerdos.

3. Hipótesis

1. Se espera encontrar mayor concentración de los elementos traza de acuerdo a su fuente:

a) para el Hg en lugares con actividad industrial y presencia de termoeléctricas.

b) para el Cd, en las zonas cercanas a las surgencias y/o a ventilas hidrotermales por su origen natural, y en sitios con agricultura intensiva por su origen antropogénico.

c) para el As en lugares de actividad minera e industrial.

2. Diferentes especies de macroalgas localizadas en un mismo sitio, dentro del GC, presentarán concentraciones similares de Hg, Cd y As.

3. Especímenes de una misma especie y/o género tendrán diferentes concentraciones de Hg, Cd y As dependiendo el grado de exposición al metal.

4. Objetivo General

Evaluar el grado de contaminación por elementos traza no esenciales (Hg, Cd, As) en ecosistemas costeros del Golfo de California mediante el uso de macroalgas como biomonitores.

4.1. Objetivos particulares

- Analizar los elementos traza no esenciales (Hg, Cd y As) en tejidos de macroalgas muestreados en ecosistemas costeros del Golfo de California.
- Establecer los niveles naturales de estos elementos en especies de macroalgas muestreados en un ambiente prístino o menos impactado.
- Identificar los puntos más enriquecidos en elementos traza no esenciales en ecosistemas costeros del Golfo de California y relacionar los contenidos de metales con fuentes potenciales de contaminación
- Evaluar las posibles diferencias en las concentraciones de Hg y Cd entre las épocas climáticas contrastantes (lluvias y secas) en ambientes costeros selectos de Sinaloa.
- Determinar la variabilidad espacio-temporal en los contenidos de Hg y Cd en macroalgas de un mismo ecosistema costero (Estero de Urias).

5. Área de estudio

El Golfo de California (GC), también conocido como mar de Cortés o mar Bermejo, es una extensión del Océano Pacífico que se ubica entre la península de California y se encuentra bordeado por los estados de Baja California Sur y Norte (al oeste) y Sinaloa Sonora y Nayarit (al este). El GC representa apenas el 0.008% de todos los mares del mundo; se extiende desde el delta del Río Colorado hasta Cabo San Lucas, en el extremo sur de la Península de Baja California y Cabo Corrientes, Jalisco en el macizo continental. Mide alrededor de 1203 km de largo por un promedio de 150 km de ancho. La porción norte del Golfo es una región poco profunda (<200 m en promedio) y se caracteriza por su enriquecimiento debido a las intensas corrientes de marea, que alcanzan los 9 metros de amplitud (Santamaría del Ángel et al., 1994), gran turbidez, sedimentos gruesos, temperaturas extremas, alta evaporación y salinidad (Maluf, 1983).

La parte marina y la terrestre comprende una área de 540,000 Km² con aproximadamente 283,000 Km² de superficie marina (WWF, 2004). Al Golfo de California se encuentran asociados 23 ecosistemas marinos constituidos por estuarios, lagunas costeras y bahías con una superficie mayor a 21,000 km² (INEGI, 1999). También se encuentran 244 islas e islotes y junto con los estuarios y lagunas tienen una enorme importancia ecológica por proveer de hábitat para una alta diversidad de especies de plantas y animales, muchas de ellas endémicas y en peligro de extinción (Espinoza-Avalos, 1996; Hendrickx et al., 2002; WWF, 2006). Se estima que dicho ecosistema, contiene 4,500 especies conocidas de invertebrados marinos, 532 especies de macroalgas, 181 especies de aves y 695 de plantas, y alberga un 40% de

las especies de mamíferos marinos que existen en el mundo, y un tercio del total de las especies de cetáceos (WWF, 2006).

Geográficamente, el mar de Cortés se ubica en una región de clima subtropical, lo cual ocasiona grandes variaciones climáticas anuales, e incluso diarias. Durante el invierno, la temperatura desciende considerablemente en la parte norte, produciéndose heladas. En el verano, se presentan tormentas tropicales en la parte sur. La temperatura promedio del mar de Cortés es de 24°C. En la parte norte, las lluvias son muy escasas y suelen ocurrir entre octubre y mayo.

5.1. Regionalización del Golfo de California

Con el fin de distinguir entre los diferentes grados de impactos antropogénico en el Golfo de California y las consecuencias ambientales en los diferentes ecosistemas estudiados, la línea costera del Golfo se dividió en 4 regiones geográficas de acuerdo a la intensidad de las actividades antropogénicas (Figura 3.). Las regiones son: Región 1 (R1), ubicada en la costa este del estado de Baja California; Región 2 (R2), en la costa noroeste de Sonora (al norte de Bahía de Kino); Región 3 (R3), en la costa este de Baja California Sur, y finalmente la Región 4 (R4) se localizó al sur de Sonora (desde Bahía de Kino) y toda la costa de Sinaloa.

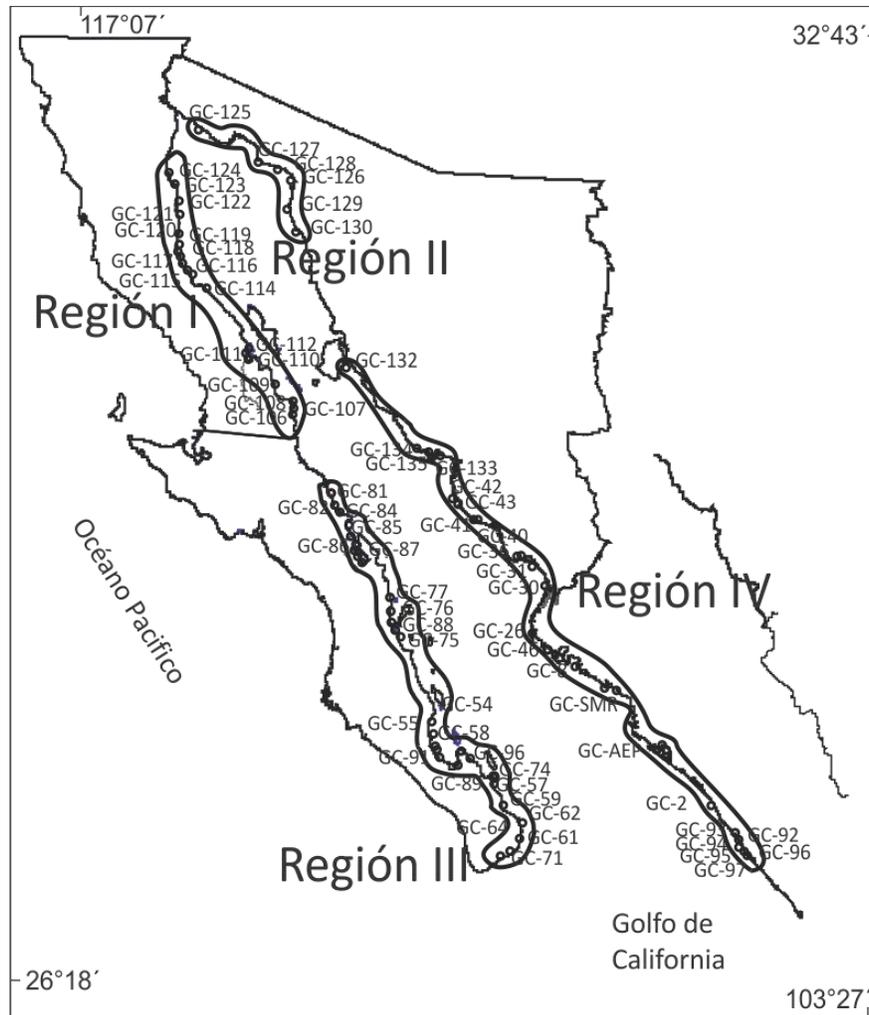


Figura 3. Regionalización y estaciones del Golfo de California trabajadas en este estudio.

5.2. REGION 1: Baja California

La Región 1 está localizada en la costa este del estado de Baja California, desde 28°00' a 32° 43' de latitud norte y desde 112°47' a 117°07' de longitud oeste. La Región 1 (Figura 4) queda completamente dentro del estado de Baja California que representa el 3.7% de la superficie del país, cuenta con una extensión territorial continental de

71,463 km², y 1,406 km de litoral (689 km en el Golfo de California). En esta región se establecieron 19 estaciones de muestreo con base a la accesibilidad de los sitios.

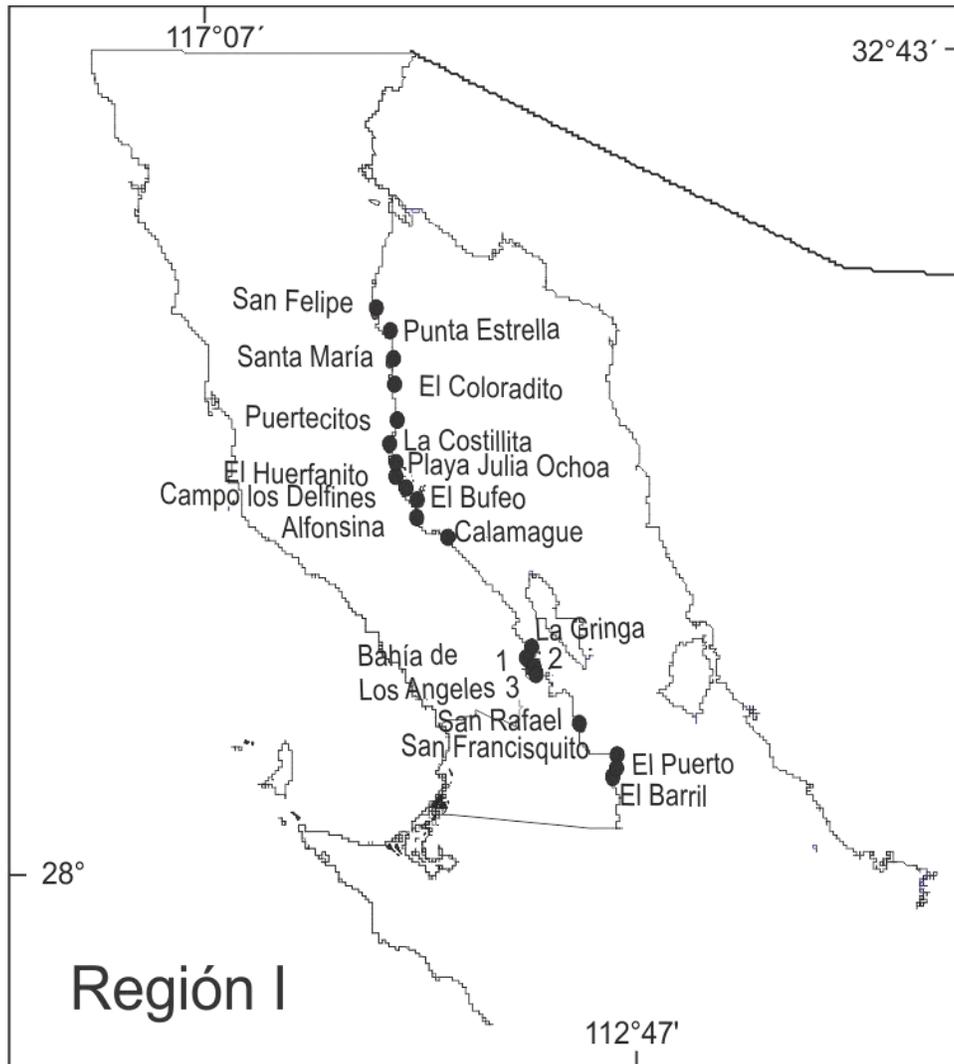


Figura 4. Región 1 del Golfo de California.

En la R1 las actividades que predominan son la agricultura (trigo, alfalfa y algodón) y la actividad ganadera (bovino, porcino, ovino, caprino, equino y aves). Entre las bahías más importantes en el Estado por su producción acuícola están Bahía de

Todos Santos y de San Quintín (cultivo de mejillón), en la costa oeste del GC, además de la Bahía de San Luis Gonzaga, Bahía de Los Ángeles y Bahía de San Fermín.

5.3. REGION 2: Norte de Sonora

La región R2 (Figura 5) se ubicó en la costa oeste del estado del norte de Sonora (al norte de Bahía de Kino). La región se localiza al norte 32°29', al sur 26°18' de latitud norte; al este 108°25', al oeste 115°03' de longitud oeste. Sonora representa el 9.2% de la superficie del país (184,934 km²) y cuenta con un total de 72 municipios. La densidad poblacional de Sonora es de 15 hab/km² con una población total de 2,662,480 hab (INEGI, 2010). Se cuenta con actividad ganadera extensiva y agrícola. La ganadería en Sonora se realiza en dos formas: una extensiva, que se lleva a cabo en forma dispersa utilizando los espacios de agostadero; otra intensiva, que se realiza empleando praderas artificiales y la producción de forrajes en áreas donde existe agricultura de irrigación. Se encuentra una termoeléctrica ubicada en Puerto Libertad que tiene 4 unidades, establecida desde 1985 y con una capacidad efectiva instalada de 632 MW. En la R2 se tuvieron cinco estaciones de muestreo.

5.4. REGION 3: BAJA CALIFORNIA SUR

La región R3 se ubicó en el estado de BCS., al noroeste del territorio mexicano, ocupando la mitad sur de la Península de Baja California. Esta zona limita al norte con el estado de Baja California situado por encima del paralelo 28°N, al este con el GC y al

sur y oeste con el Océano Pacífico. Su capital es la ciudad de La Paz. Se extiende por una superficie de 73 475 km², ocupando un 3.8% del territorio nacional. Sus principales

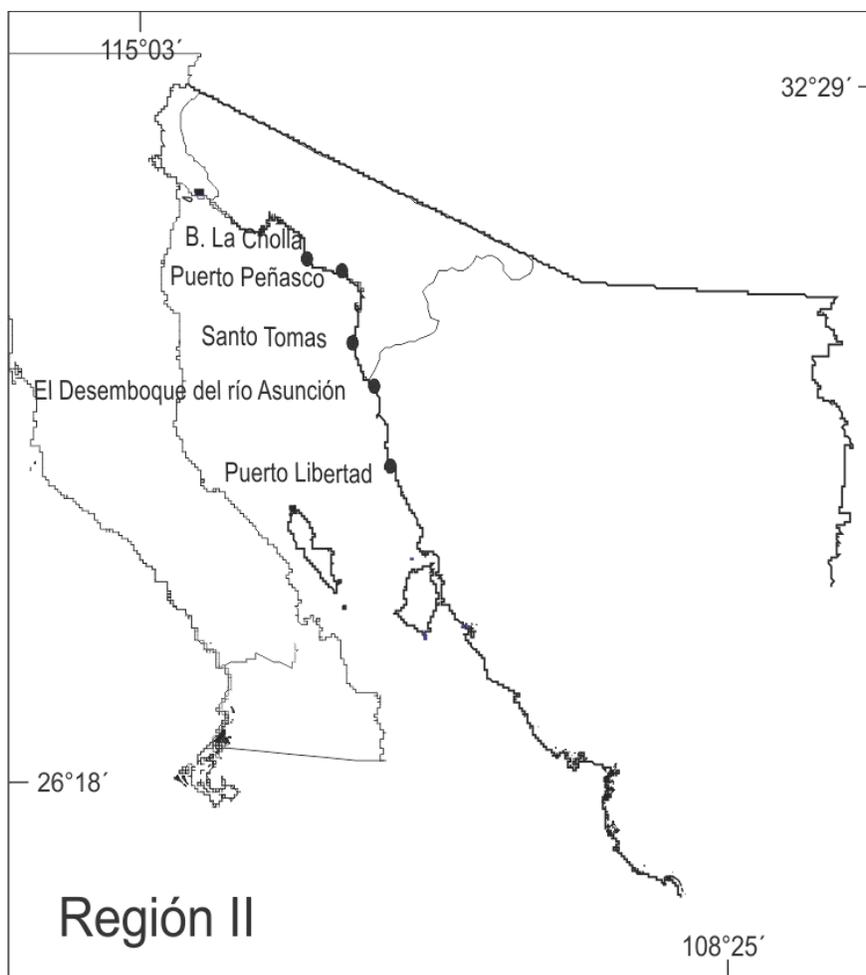


Figura 5. Región 2 del Golfo de California.

actividades económicas son el turismo y la pesca. Se cuenta con una termoeléctrica en La Paz (Punta Prieta II) con 3 unidades, establecida en 1979 y con 113 MW de capacidad efectiva instalada. En la R3 se establecieron 29 estaciones de muestreo (Figura 6).



Figura 6. Región 3 del Golfo de California.

5.5. REGION 4: SUR DE SONORA Y SINALOA

Esta región se localiza al norte en el estado de Sonora $32^{\circ}29'N$, y al sur en Sinaloa $26^{\circ}18'N$. En esta región se realiza la actividad agrícola y ganadera más intensiva del país. La ganadería intensiva se efectúa principalmente en los valles

agrícolas de los Ríos Yaqui y Mayo, donde es importante la producción lechera, el ganado porcino, así como la actividad avícola para la producción de carne y huevo. En los valles del centro-sur de Sonora y centro-norte de Sinaloa se tienen los distritos más importantes del país, caracterizados por la producción intensiva de trigo y maíz, y diversas hortalizas y frutas.

En la R4 se encuentran establecidas tres termoeléctricas, una en Topolobampo (Juan de Dios Batiz P.) que tiene 3 unidades y opera desde 1995 con 320 MW de capacidad efectiva instalada. Otra se localiza en Mazatlán (José Aceves Pozos) establecida de 1976 y que cuenta con 3 unidades con una capacidad efectiva instalada de 616 MW. La tercera se localiza en el Puerto de Guaymas (Carlos Rodríguez Rivero) establecida desde 1973 y que tiene 4 unidades con una capacidad efectiva instalada 486 MW. En la R4 se establecieron 26 estaciones de muestreo (Figura 7).

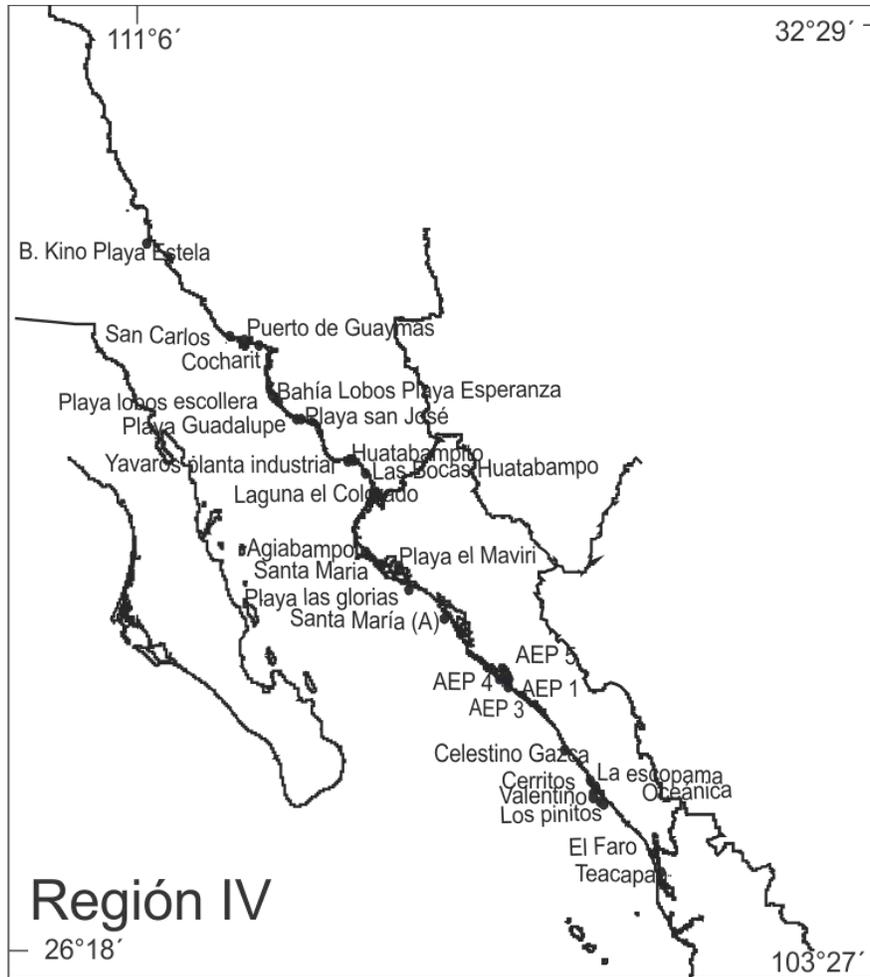


Figura 7. Región 4 del Golfo de California

6. Sitios de muestreo

En este estudio se estableció una red de muestreo con un total 152 estaciones localizadas a lo largo de la línea de costa del Golfo de California cubriendo las cuatro regiones (Figura 3). Se realizaron dos muestreos intensivos en las primaveras del 2008

y 2009, recolectándose un total de 820 especímenes de las tres Divisiones, Chlorophyta, Phaeophyta y Rhodophyta. Se consideraron las especies de macroalgas más abundantes y representativas de cada sitio. Los puntos de muestreo se eligieron de acuerdo a la accesibilidad, y a la presencia y/o abundancia de los organismos. Por último, cada punto fue geo-referenciado mediante el uso de un instrumento de posicionamiento global (GPS- Explorist 200 Magellan).

Además de la red de monitoreo a lo largo de la costa del Golfo, en las costas del Estado de Sinaloa se realizó un muestreo más intensivo cubriendo dos épocas climáticas contrastantes de la región (secas y lluvias) (Figura 8), recolectándose un total de 126 especímenes. Estos muestreos se realizaron en la segunda mitad o hacia el final de cada una de las épocas climáticas dominantes en la región, que son secas (Abril y Mayo) y lluvias (Octubre y Noviembre).

Asimismo se estableció una red de monitoreo mensual localizada dentro del Estero de Urias para el muestreo de las especies de macroalgas dominantes durante un año, recolectándose un total 474 especímenes de una red de 19 estaciones (Figura 9). Juntamente con la colecta de muestras, se realizaron mediciones *in situ* de variables fisicoquímicas (pH, temperatura) para hacer comparaciones espaciales y temporales de las condiciones ambientales. Los muestreos mensuales se dividieron de la siguiente manera:



Figura 8. Lagunas costeras del Estado de Sinaloa en las que recolectaron macroalgas en dos épocas climáticas.

- a) Por épocas: Secas frías, (Feb., Abril, Nov., Dic. del 2009 y Ene., Feb. y Mar. del 2010); Lluvias (de Julio a octubre del 2009) y secas cálidas (Mayo, Junio y Julio del 2009).
- b) Por ambientes: Ambiente lagunar (AL): UR1-UR4 y UR14; ambiente lagunar marino (LM): UR5-UR13 y UR17; y ambiente marino (M): UR15-UR19, excepto UR17.

c) Por fuentes de aporte de metal: granja (UR1-UR2), Manglar-mezcla (UR3), agrícola-urbana (UR4), Urbana-agrícola-granja (UR5), lagunar-mezcla (UR6-UR7), Industrial (UR8-UR13), Urbana (UR14), zona portuaria (UR15-UR16), Urbana-marina-canal (UR17) e Influencia marina (UR18-UR19).

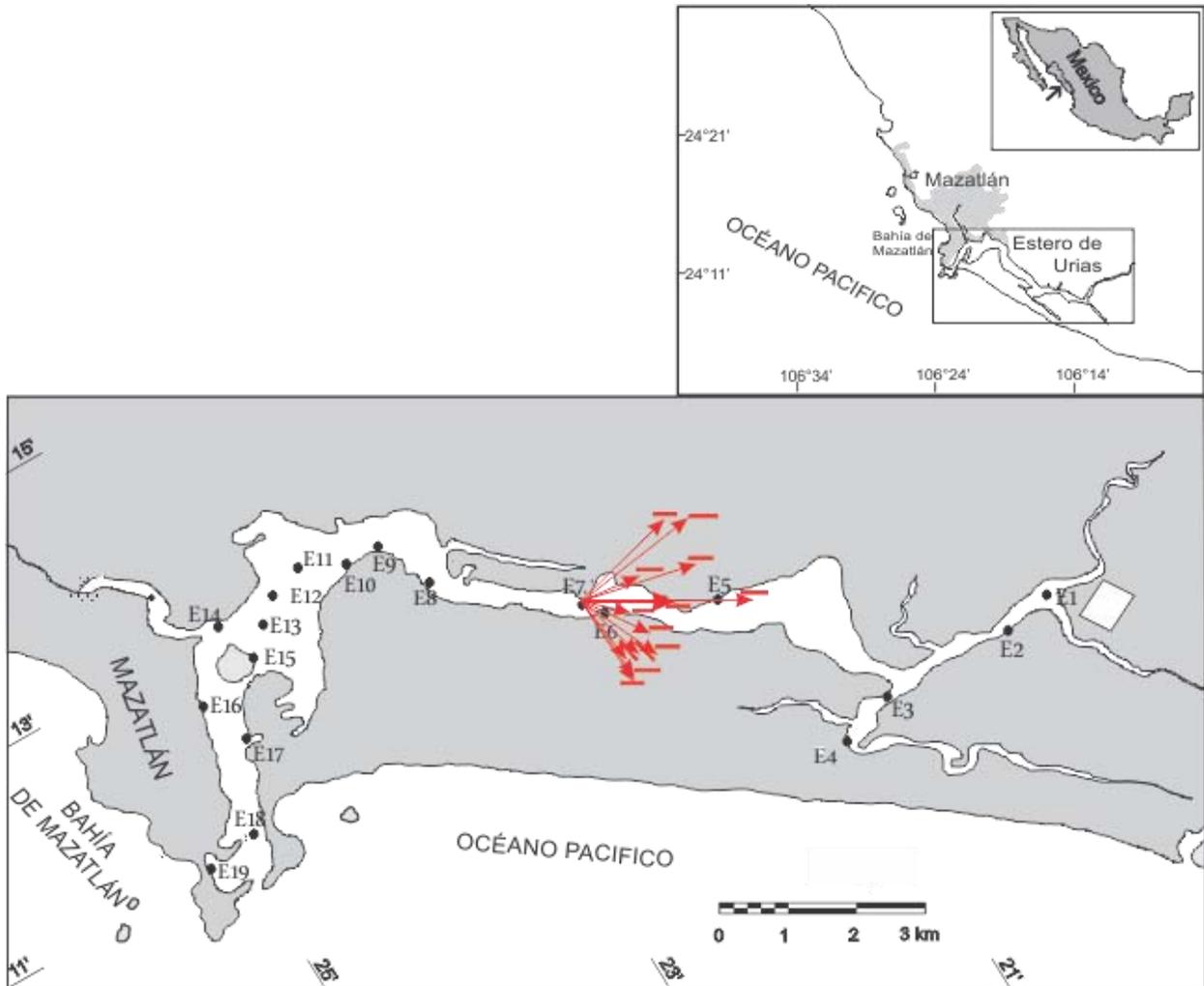


Figura 9. Estaciones establecidas en el Estero de Urias para la colecta mensual de macroalgas y en flechas las resultantes mensuales de los vientos.

7. Metodología

7.1. Recolección y preparación de muestras

Las muestras de macroalgas se recolectaron a mano por inmersión al agua o mediante buceo libre. Las muestras de las diferentes especies de un mismo punto fueron colocadas en una misma bolsa ziplock debidamente etiquetada con la clave de la estación, posición geográfica y día y hora del muestreo. Las muestras fueron almacenadas en hieleras herméticamente cerradas enfriadas con bolsas de gel congelado. Al finalizar la jornada de muestreo, las muestras de macroalgas fueron lavadas con agua potable para remover sedimentos y sales, y cepilladas suavemente para la eliminación de epibiontes. Al final se enjuagaron con agua MilliQ. Las diferentes especies colectadas en cada sitio fueron separadas y empacadas individualmente en bolsas ziplock debidamente etiquetadas y todas colocadas dentro de un mismo paquete. Las muestras se congelaron inmediatamente como fue posible. Una porción pequeña de cada muestra fue separada en recipientes con fenol al 4% en agua de mar para su posterior identificación.

Una vez en el laboratorio de Isotopía Estable de la Unidad Académica Mazatlán del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), las muestras congeladas fueron colocadas en charolas de plástico desechables para ser pesadas y posteriormente se liofilizaron a una temperatura de -48°C con un presión de vacío de $<90 \times 10^{-3} \text{mB}$ durante 72-96 horas utilizando una liofilizadora Labconco/Freezone. Una vez secas se molieron con un mortero hasta

polvo fino, se almacenaron en recipientes de vidrio de cierre hermético para realizarse el posterior análisis.

7.2. Identificación de las macroalgas

La identificación de los especímenes colectados se realizó de acuerdo a las características morfológicas externas, internas y reproductivas como: forma del talo, tipo de ramificaciones, células de crecimiento, tipo de células y estructuras reproductivas entre otras. Se utilizó un microscopio compuesto y se hicieron cortes transversales y longitudinales del talo para conocer las características internas. Se utilizaron claves dicotómicas referidas para la flora de estas costas: Setchell y Gardner (1920; 1924), Abbott y Hollenberg (1976), Ochoa- Izaguirre et al., (2002). La identificación se realizó hasta nivel de especie o al menos a nivel de género donde no fue posible establecer la especie. Este trabajo se llevó en el laboratorio de Macroalgas de la Facultad de Ciencias del Mar de la Universidad Autónoma de Sinaloa, a cargo de la M.C. Julia Ochoa Izaguirre.

7.3. Análisis de muestras

Alícuotas (≈ 0.2 g) de macroalgas secas, molidas y homogeneizadas se pre-digieren con una mezcla de ácidos concentrados de alta pureza (10 ml HCl:HNO₃, 1:3 v/v; + 1 ml H₂SO₄) durante 12-24 horas en bombas de teflón Savillex. Posteriormente, se digieren en una plataforma de calentamiento Mod-Block durante 4 horas a 120°C. Una vez enfriadas se transfirieron a viales de plástico debidamente etiquetados y se

aforaron con agua Milli-Q a aproximadamente 25 ml. Las muestras digeridas fueron divididas en tres porciones, una para análisis de As (10 ml), otra para Hg (10 ml) y la porción restante para el análisis de Cd.

Para el As fue necesario realizar una evaporación controlada hasta sequedad. Posteriormente, se reconstituyó el digerido con una solución de HCl 1 M (10 ml). Al digerido reconstituido se le adicionó 1 ml de solución de KI 0.1 M con ácido ascórbico y se dejó reposar en la oscuridad por al menos 50 min para la conversión del As(V) a As(III). Posteriormente se realizó la cuantificación del As en un Espectrofotómetro de Absorción Atómica operado en modo de flama acoplado a un generador de hidruros (HG-FAAS, VARIAN modelo VGA-77) empleando como agente reductor una solución básica de borohidruro de sodio (NaBH_4) con HCl al 25% (v/v). En la celda de reacción se genera H_2 el cual se combina con el As(III) para formar arsina (AsH_3) el cual es arrastrado por N_2 a la celda T expuesta a la flama y donde se produce la liberación del As elemental por combustión de la arsina.

El Hg se cuantificó en el mismo equipo FAAS pero acoplado a un generador de vapor frío (CVAAS). Para el análisis de Hg en solución fue necesaria la reducción del Hg^{2+} a Hg^0 mediante la generación del hidruro a partir de una solución de cloruro estanoso (SnCl_2) y un exceso de HCl. El Hg^0 es arrastrado por N_2 hacia la celda T por donde pasa el haz de luz y es realizada la cuantificación del metal basado en su absorbancia.

Finalmente, la cuantificación de Cd se realizó directamente de la solución digerida por espectrofotometría de absorción atómica mediante el uso de horno de grafito (GFAAS VARIAN, modelo GTA-110). En este caso una alícuota de 20 μ L de muestra es depositada en el interior de un tubo de grafito, el cual es calentado gradualmente por descargas eléctricas hasta alcanzar la temperatura de vaporización del Cd.

7.4. Análisis estadísticos de los datos.

Se calcularon medias y desviación estándar, medianas y percentiles (25 y 75%) de los datos procesados, utilizando el paquete estadístico Excel 2007. Para hacer comparaciones se agruparon las algas por división, géneros y especies, por estaciones y por región. Para este propósito se utilizó el paquete estadístico Sigma 3.5 realizando Anova de una sola vía, pruebas de Kruskal-Wallis y prueba de Dunn donde fué necesario, corroborando y elaborando gráficas mediante el paquete estadístico Statistica 7.

8. Resultados

8.1 Mercurio en macroalgas del Golfo de California

El valor promedio de Hg en las macroalgas recolectadas a lo largo de la zona costera del Golfo de California fue de $0.21 \pm 0.58 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco. Los valores máximos de hasta $6.61 \mu\text{g g}^{-1}$ se encontraron en la Playa de La Paz (BCS, GC-74) con la especie *Gracilaria vermiculophylla* y los mínimos de $0.01 \mu\text{g g}^{-1}$ en Bahía de los Ángeles (BC, GC-109) y Mulegé (BCS, GC-83) con especies de la División Rhodophyta y Phaeophyta.

De acuerdo con la Figura 10 la mayoría de muestras están dentro del rango comprendido entre 0.05 y $0.08 \mu\text{g g}^{-1}$ ($n=182$ especímenes que equivalen al 14%). Cerca del 3% ($n=35$) de las muestras se encuentran por debajo del límite de detección (el cual fue calculado en $0.006 \mu\text{g g}^{-1}$). En general más del 50% del total de las muestras están dentro del rango que va desde valores $<L.D.$ hasta $0.1 \mu\text{g g}^{-1}$ ($n=732$ especímenes). Considerando estos valores bajos, podemos establecer como valor de referencia natural para el Hg en las macroalgas del Golfo de $0.055 \pm 0.03 \mu\text{g g}^{-1}$ (Tabla 1). Esto se determinó calculando el promedio de las concentraciones entre $<LD$ y $0.1 \mu\text{g g}^{-1}$.

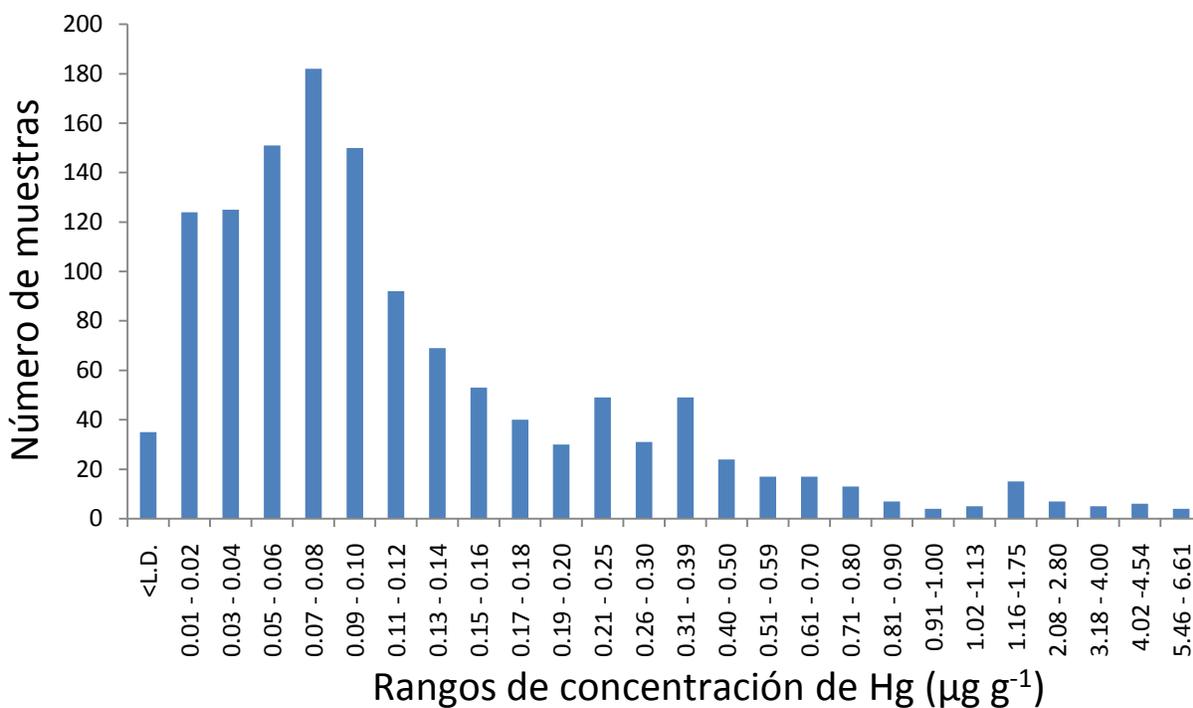


Figura 10. Frecuencia de concentración de mercurio en macroalgas recolectadas en la zona costera del Golfo de California. L.D.= $0.006 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco.

Tabla 1. Valores de referencia (promedio \pm sd) estimados para Hg, Cd y As en macroalgas recolectadas en el Golfo de California para las tres Divisiones ($\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco).

Metal	Valor promedio	VALORES DE REFERENCIA		
		Chlorophyta	Phaeophyta	Rhodophyta
Hg	0.055 \pm 0.03	0.055 \pm 0.03	0.045 \pm 0.02	0.048 \pm 0.03
Cd	0.05 \pm 0.03	0.05 \pm 0.02	0.56 \pm 0.27	0.06 \pm 0.03
As	3.35 \pm 0.13	0.78 \pm 0.8	2.97 \pm 0.45	2.04 \pm 0.6

El rango de concentraciones más bajas correspondió a la División Chlorophyta ($0.07 \pm 0.02 \mu\text{g g}^{-1}$), a la Phaeophyta ($0.06 \pm 0.03 \mu\text{g g}^{-1}$) y Rhodophyta ($0.05 \pm 0.03 \mu\text{g g}^{-1}$). Aunque sin diferencias significativas (ANOVA, $p < 0.05$).

Un total de 53 especímenes que equivalen al 4.1% tuvieron las concentraciones mayores de Hg, variando desde 0.81 hasta $6.61 \mu\text{g g}^{-1}$. En promedio por División, los especímenes de rodofitas mostraron las mayores concentraciones ($2.57 \pm 1.73 \mu\text{g g}^{-1}$), seguidas de las clorofitas ($2.01 \pm 1.33 \mu\text{g g}^{-1}$) y las feofitas ($1.76 \pm 1.49 \mu\text{g g}^{-1}$).

En cuanto a la localización geográfica, se observó que las concentraciones promedio máximas se encontraron en la región 3 ($0.34 \pm 0.90 \mu\text{g g}^{-1}$) y las mínimas en la región 2 ($0.08 \pm 0.05 \mu\text{g g}^{-1}$). A pesar de que se observa el siguiente orden de concentración $R3 > R4 > R1 = R2$, solo se encontraron diferencias significativas entre R3 con R2 ($p < 0.05$) debido a la alta variabilidad en las concentraciones de Hg entre regiones y el diferente número de especímenes (Tabla 2).

Al comparar las concentraciones de Hg de las clorofitas entre todas las regiones no se encontraron diferencias significativas ($p < 0.05$; prueba Dunn) (Tabla 3). Esto es principalmente por la alta variabilidad de los resultados obtenidos entre regiones (CV= 50-100%) y debido al número desigual de muestras. En cuanto a las feofitas, se encontraron diferencias significativas ($p < 0.05$) solamente entre la R4 y la R1. Al comparar las concentraciones de rodofitas entre las diferentes regiones, se encontraron diferencias significativas entre las R1 y R4 ($p < 0.05$).

Tabla 2. Comparación de Hg, Cd y As ($\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) entre las diferentes regiones. Pruebas realizadas: *Kruskal-Wallis y **Dunn.

MERCURIO				
REGIÓN	n	PROM \pm SD**	CV %	MEDIANA
1	131	0.09 \pm 0.12	122	0.07(0.0281-0.105)
2	43	0.08 \pm 0.05	57	0.07(0.0536-0.0927)
3	292	0.33 \pm 0.89	267	0.08(0.0297-0.191)
4	261	0.17 \pm 0.25	150	0.09(0.0596-0.152)
R3>R4>R1=R2				
CADMIO				
REGIÓN	n	PROM \pm SD**	CV %	MEDIANA
1	141	2.73 \pm 1.91	70	2.08(1.285-3.933)
2	45	2.20 \pm 1.51	69	1.74(0.908-3.122)
3	279	2.27 \pm 1.83	80	1.74(0.944-3.146)
4	253	2.27 \pm 2.17	96	1.57(0.847-3.099)
R1>R4=R3=R2				
ARSÉNICO				
REGIÓN	n	PROM \pm SD**	CV %	MEDIANA
1	113	4.14 \pm 1.90	46	3.37(3.085-4.208)
2	17	5.19 \pm 1.76	34	5.4(3.717-6.135)
3	247	4.18 \pm 1.82	43	3.64(3.186-4.367)
4	118	4.85 \pm 7.24	143	3.51(3.0555-5.025)
R2>R1=R3=R4				

Tabla 3. Comparación de Mercurio de promedios ($\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) y medianas entre las diferentes regiones, de cada una de las divisiones. Pruebas realizadas: *Kruskal-Wallis y **Dunn.

CHLOROPHYTA				
REGIÓN	n	PROM \pm SD**	C.V. %	MEDIANA
1	21	0.10 \pm 0.12	119	0.07(0.036-0.09)
2	9	0.08 \pm 0.05	61	0.06(0.0581-0.088)
3	70	0.30 \pm 0.82	267	0.09(0.0374-0.213)
4	109	0.15 \pm 0.17	113	0.1(0.0675-0.157)

PHAEOPHYTA				
REGIÓN	n	PROM \pm SD**	C.V. %	MEDIANA
1	54	0.08 \pm 0.09	110	0.07(0.032-0.0994)
2	13	0.08 \pm 0.03	40	0.08(0.0624-0.0952)
3	119	0.22 \pm 0.57	259	0.09(0.0390-0.165)
4	79	0.17 \pm 0.25	150	0.09(0.063-0.15)

RHODOPHYTA				
REGIÓN	n	PROM \pm SD	C.V. %	MEDIANA*
1	56	0.10 \pm 0.13	130	0.07(0.024-0.108)
2	21	0.08 \pm 0.05	64	0.07(0.04-0.106)
3	103	0.49 \pm 1.21	245	0.06(0.0232-0.22)
4	73	0.20 \pm 0.35	174	0.09(0.051-0.190)

En las clorofitas el comparativo de la región 2 no se realizó debido al bajo número de especímenes muestreados en esa región.

8.2 Cadmio en macroalgas del Golfo de California

El valor promedio de Cd de las macroalgas muestreadas en el Golfo de California fue de $2.31 \pm 1.96 \mu\text{g g}^{-1}$, con un máximo de $15.83 \mu\text{g g}^{-1}$ en Playa Guadalupe (Sonora, GC-41) con la especie *Spyridia filamentosa* y un mínimo de $0.01 \mu\text{g g}^{-1}$ en el estero de Urías (Mazatlán, Sin.; GC-155) con la especie *Ulva lobata*.

De acuerdo con la Figura 11, más del 50% de los especímenes se encuentran en el rango de concentración de <L.D. ($0.002 \mu\text{g g}^{-1}$) hasta $1.00 \mu\text{g g}^{-1}$. Un 5% de los especímenes estudiados ($n=61$) están por debajo de L.D. El rango de concentración más bajo ($0.01-0.03 \mu\text{g g}^{-1}$) representó un 3.7% con 48 especímenes. El rango de concentración más frecuente entre los valores de menor concentración fue el comprendido entre $0.04-0.06 \mu\text{g g}^{-1}$ (5.44% con 71 especímenes). Con base a estos valores se calculó un valor de referencia para el Cd de $0.05 \pm 0.03 \mu\text{g g}^{-1}$ (Tabla 1), siendo mayoría de los especímenes de la División Chlorophyta. Las menores concentraciones fueron registradas en el Estero de Urias en la R4, en la Bahía de La Paz (BCS, GC-74, GC-90) y en Punta Chivato (BCS, GC-82) en la R3.

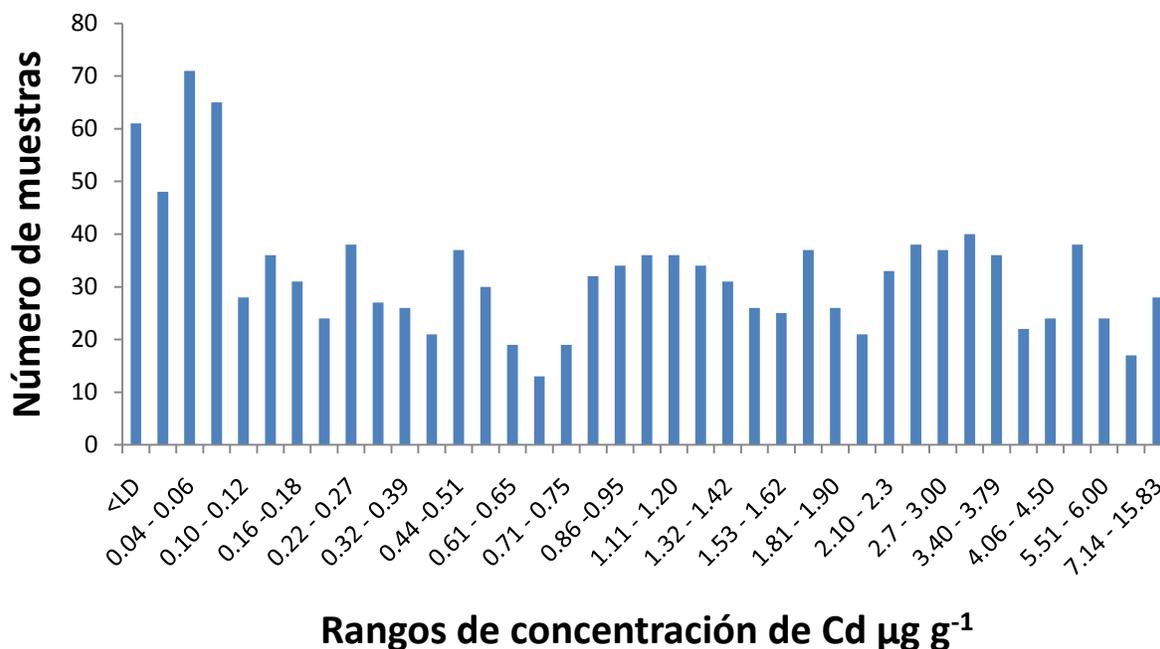


Figura 11. Número de especímenes analizados de acuerdo al rango de concentración de Cd en $\mu\text{g g}^{-1}$. L.D. = $0.002 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco.

El rango de valores más alto ($7.14-15.83 \mu\text{g g}^{-1}$) equivalen al 2.1% ($n= 28$) correspondientes a especímenes colectados principalmente en la parte central del Golfo de California (abarcando parte de todas las regiones). En particular en estaciones de Navachiste (Sinaloa), Bahía Kino (GC-132), Playa Guadalupe y Cocharit (GC-135) en Sonora, San Bruno (GC-81) y Bahía de los Ángeles en BCS. El valor máximo ($15.83 \mu\text{g g}^{-1}$), localizado en Playa Guadalupe, Son., se encuentra enriquecido en más de 300 veces respecto del valor de referencia. En su mayoría corresponden a macroalgas de la División Rhodophyta y Phaeophyta.

En general, se encontraron diferencias significativas ($p<0.05$) sólo en las macroalgas de las regiones 1 y 4 (Tabla 2). Pero cuando el análisis se realiza por división, las clorofitas del Golfo no presentaron diferencias significativas ($p=0.763$) entre

regiones, mismos resultados se observaron para las feofitas ($p=0.052$) y rodofitas ($p=0.786$). (Tabla 4).

Tabla 4. Comparación de cadmio de promedios ($\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) y medianas entre las diferentes regiones, de cada una de las divisiones. Pruebas realizadas: *Kruskal-Wallis y **Dunn.

CHLOROPHYTA				
REGIÓN	n	PROM \pm SD	C.V. %	MEDIANA*
1	22	1.61 \pm 2.04	127	1.19(0.590-1.58)
2	9	1.61 \pm 1.86	116	0.91(0.608-1.554)
3	66	1.38 \pm 1.17	85	1.12(0.766-1.839)
4	99	1.20 \pm 1.17	97	1.06(0.437-1.584)

PHAEOPHYTA				
REGIÓN	n	PROM \pm SD	C.V. %	MEDIANA*
1	61	3.12 \pm 1.57	50	3.07(1.882-3.973)
2	14	2.23 \pm 1.20	54	2.33(0.873-3.458)
3	116	2.79 \pm 2.14	77	2.21(1.142-4.019)
4	81	3.32 \pm 2.27	68	2.87(1.485-4.963)

RHODOPHYTA				
REGIÓN	n	PROM \pm SD	C.V. %	MEDIANA*
1	58	2.74 \pm 2.03	74	1.88(1.086-3.97)
2	22	2.41 \pm 1.53	63	2(1.237-3.274)
3	97	2.35 \pm 1.59	68	1.96(1.102-3.271)
4	73	2.58 \pm 2.59	100	1.9(0.74-3.414)

En las clorofitas el comparativo de la región 2 no se realizó debido al bajo número de especímenes colectado en esa región.

8.3 Arsénico en macroalgas del Golfo de California

El promedio de As encontrado en las macroalgas del Golfo de California fue de $4.39 \pm 3.75 \mu\text{g g}^{-1}$, encontrándose un valor máximo de $80.04 \mu\text{g g}^{-1}$ en Agiabampo (Navojoa, Sonora; GC-26) en la especie *Rhizoclonim implexum*. El valor mínimo ($0.17 \mu\text{g g}^{-1}$) fue encontrado en Bahía Lobos (GC-43, Sonora) con macroalgas de la División Chlorophyta.

De acuerdo con la Figura 12, el rango de valores más frecuente está entre 3.20 y $3.50 \mu\text{g g}^{-1}$. El rango de valores más bajo ($0.17-1.79 \mu\text{g g}^{-1}$) con 17 especímenes que equivale al 3%, predominando las clorofitas y feofitas. Estas algas fueron recolectadas en estaciones como de Playa Notri (GC-76), cerca de Mina de la Soledad (GC-79) y en San Bruno en BCS, y en Playa Guadalupe en Sonora. De acuerdo con esto se calculó un valor de referencia para As en macroalgas de $3.35 \pm 0.13 \mu\text{g g}^{-1}$ (Tabla 1).

En el rango de valores más alto ($10.0-80.0 \mu\text{g g}^{-1}$) se encontraron 9 especímenes recolectados en estaciones como la de Agiabampo y Playa San José (GC-36) en Sonora y Mulegé, en BCS. La mayoría son macroalgas de la División Phaeophyta.

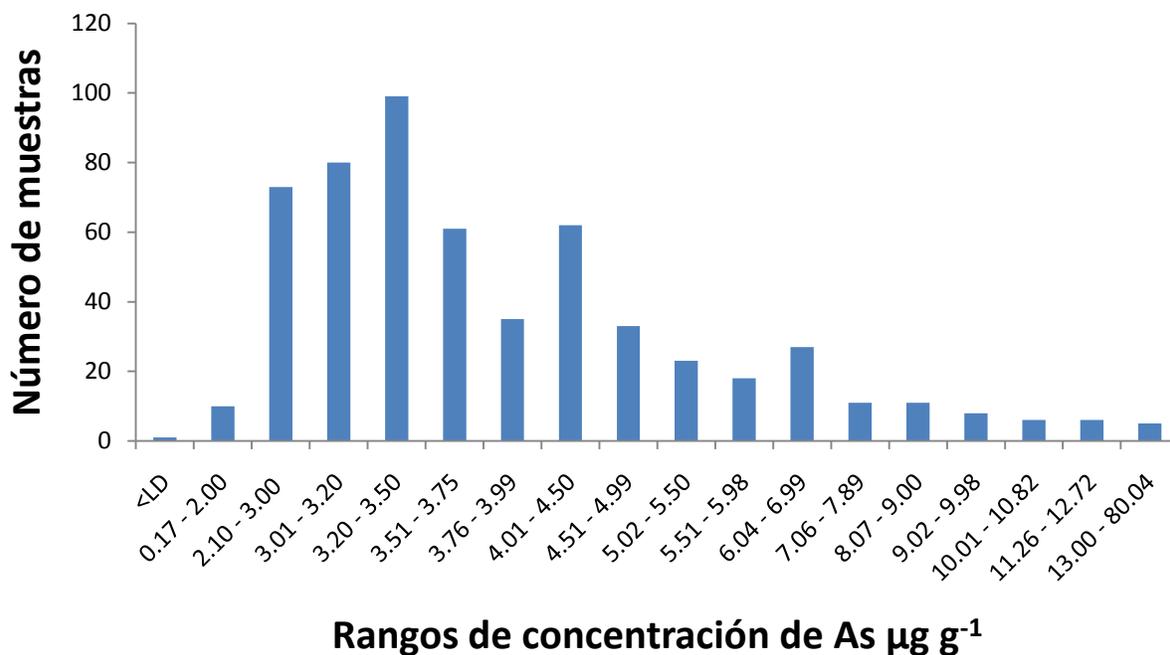


Figura 12. Número de especímenes analizados de acuerdo al rango de concentración de As en $\mu\text{g g}^{-1}$. LD=0.06 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco.

La concentración más alta es 24 veces mayor al de referencia. En general en la región 3 y 4 se encuentran los valores más extremos.

Se encontraron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las macroalgas de la región 2 con la región 1 y la región 3 (Tabla 2).

Al comparar las concentraciones de As de las algas clorofitas entre las regiones del Golfo, no se observan diferencias significativas ($p = 0.105$). Entre los especímenes de feofitas y rodofitas tampoco hay diferencias significativas ($p = 0.143$ y 0.148 , respectivamente) (Tabla 5).

Tabla 5. Comparación de Arsénico de promedios ($\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) y medianas entre las diferentes regiones, de cada una de las divisiones. Pruebas realizadas: *Kruskal-Wallis y **Dunn.

CHLOROPHYTA				
REGIÓN	n	PROM \pm SD	C.V. %	MEDIANA*
1	16	4.33 \pm 1.59	37	3.65(3.197-5.034)
2	3	4.78 \pm 1.67	35	5.5
3	61	3.66 \pm 0.66	18	3.54(3.301-4.070)
4	39	6.13 \pm 12.23	200	4.05(3.321-5.152)

PHAEOPHYTA				
REGIÓN	n	PROM \pm SD	C.V. %	MEDIANA*
1	48	4.60 \pm 2.33	50	3.66(3.140-5.020)
2	6	6.33 \pm 2.09	33	6.64(4.891-7.891)
3	99	5.02 \pm 2.47	49	4.01(3.413-5.889)
4	47	4.57 \pm 2.84	62	3.5(2.708-5.503)

RHODOPHYTA				
REGIÓN	n	PROM \pm SD	C.V. %	MEDIANA*
1	49	3.62 \pm 1.35	37	3.28(3.046-3.599)
2	8	4.49 \pm 1.19	27	4.81(3.551-5.453)
3	87	3.61 \pm 1.05	29	3.3(3.045-4.026)
4	32	3.69 \pm 1.38	37	3.3(3.008-3.626)

El análisis comparativo de la región 2 no se realizó debido al bajo número de muestras colectadas.

Tabla 6. Resultados de concentración máxima y mínima de Hg, Cd y As ($\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco), por regiones y especies.

Región		Hg $\mu\text{g g}^{-1}$	Especie	División	GC	Cd $\mu\text{g g}^{-1}$	Especie	División	GC	As $\mu\text{g g}^{-1}$	Especie	División	GC
			<i>G.</i>										
GC	max.	6.61	<i>vermiculophylla</i>	Rhodophyta	74	15.83	<i>S. filamentosa</i>	Rhodophyta	41	80.04	<i>R. implexum</i>	Chlorophyta	26
			Varias especies	Rhodophyta y	83						<i>C.</i>		
	min	0.01	(22 spp.)	Phaeophyta	109	0.01	<i>Ulva lobata</i>	Chlorophyta	155	0.17	<i>amplivesiculatum</i>	Chlorophyta	43
R1	max.	0.63	<i>Rosenvingea</i> sp.	Phaeophyta	117	9.55	<i>U. acantophora</i>	Chlorophyta	109	11.7	<i>Rosenvingea</i> sp.	Phaeophyta	117
			Varias especies	Rhodophyta y	105								
	min	0.01	(9 spp.)	Phaeophyta	109	0.11	<i>U. linza</i>	Chlorophyta	124	1.93	<i>S. pacifica</i>	Rhodophyta	107
			<i>U. lactuca, G.</i>	Chlorophyta	130 y								
R2	max.	0.21	<i>spinigera</i>	Rhodophyta	131	6.77	<i>S. Johnstoniae</i>	Rhodophyta	131	8.86	<i>Sargassum</i> sp.	Phaeophyta	128
	min	0.01	<i>G. velicosa</i>	Rhodophyta	131	0.32	<i>C. albida</i>	Chlorophyta	129	2.49	<i>G. spinigera</i>	Rhodophyta	131
			<i>G.</i>										
R3	max.	6.61	<i>vermiculophylla</i>	Rhodophyta	74	9.56	<i>C. tuberculata</i>	Phaeophyta	87	14.84	<i>Zonaria</i> sp.	Rhodophyta	83
			Varias especies	Rhodophyta y									
	min	0.01	(12 spp.)	Phaeophyta	83	0.02	<i>U. acantophora</i>	Chlorophyta	79	1.38	<i>Spyridia</i> sp.	Rhodophyta	81
R4	max.	2.11	<i>G. filicina</i>	Rhodophyta	97	15.83	<i>Gigartina</i> sp.	Rhodophyta	41	80.04	<i>R. implexum</i>	Chlorophyta	26
											<i>G.</i>		
	min	0.01	<i>Sargassum</i> sp.	Phaeophyta	134	0.01	<i>U. lobata</i>	Chlorophyta	155	2.1	<i>vermiculophylla</i>	Rhodophyta	31

8.4. Comparativo por regiones del Golfo de California

8.4.1. Región 1

Esta región comprende al estado de BC que se caracteriza por tener poca actividad antropogénica. No hay actividades productivas importantes, ni industria y escasa población humana. En esta región se establecieron 18 puntos de colecta y se obtuvieron 143 especímenes de diferentes divisiones y géneros, de los cuales 61 especímenes pertenecen a la División Phaeophyta, 58 a la Rhodophyta y 23 a la Chlorophyta.

La concentración promedio de Hg para las macroalgas recolectadas fue de $0.09 \pm 0.12 \mu\text{g g}^{-1}$ variando desde niveles por debajo del L.D. de $0.006 \mu\text{g g}^{-1}$ en estaciones de Bahía de los Ángeles 1 y El Puerto (GC-107) en BC, en especies de *Sargassum* sp. y *Ulva acantophora*, hasta valores de $0.63 \mu\text{g g}^{-1}$ en la estación de El Huerfanito, BC (GC-117) con especies *Rosenvingeia* sp. y *Eucheuma* sp. De acuerdo al valor de referencia, el promedio se encuentra enriquecido en 1.63 veces.

La concentración promedio de Cd fue de $2.73 \pm 1.91 \mu\text{g g}^{-1}$, con valores que van desde debajo del L.D. ($0.001 \mu\text{g g}^{-1}$) en la estación El Huerfanito con la especie *Ulva lobata*, hasta un máximo de $9.55 \mu\text{g g}^{-1}$ en Bahía de los Ángeles 1 con la especie *U. acantophora*. De acuerdo a su valor regional de referencia, el promedio de Cd en este sitio es cerca de 55 veces más alto.

Para las concentración de As su valor promedio fue de $4.14 \pm 1.90 \mu\text{g g}^{-1}$, con valores que van desde debajo del L.D. ($0.11 \mu\text{g g}^{-1}$) en la estación de Santa María (GC-122) con la especie *Ulva lactuca* hasta $11.7 \mu\text{g g}^{-1}$ en la estación de El Huerfanito con

la especie *Rosenvingea* sp. De acuerdo con su valor de referencia, el valor promedio para el As es 1.24 veces enriquecido.

De las macroalgas colectadas en esta región, presentan una misma concentración promedio de Hg entre las rodofitas ($0.10 \pm 0.13 \mu\text{g g}^{-1}$), clorofitas ($0.10 \pm 0.12 \mu\text{g g}^{-1}$) y las feofitas ($0.08 \pm 0.09 \mu\text{g g}^{-1}$) (prueba de Dunn, $p=0.983$). Para el Cd las feofitas presentaron las concentraciones más altas ($3.12 \pm 1.57 \mu\text{g g}^{-1}$), seguidas de las rodofitas ($2.74 \pm 2.03 \mu\text{g g}^{-1}$) y las clorofitas ($1.62 \pm 2.04 \mu\text{g g}^{-1}$). Se encontraron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las clorofitas con las feofitas y rodofitas. Para el As, las feofitas presentaron los valores más altos ($4.60 \pm 2.33 \mu\text{g g}^{-1}$), seguidas de las clorofitas ($3.67 \pm 0.99 \mu\text{g g}^{-1}$) y las rodofitas ($3.62 \pm 1.35 \mu\text{g g}^{-1}$). Hubo diferencias significativas ($p < 0.05$) solo entre las feofitas y las rodofitas.

8.4.2. Región 2

Esta región está comprendida en la porción centro-norte del estado de Sonora. En ella se establecieron solo cinco estaciones de colecta, obteniéndose 45 especímenes de las 3 diferentes divisiones. Predominó la División Rhodophyta con 22 especímenes, seguida de la División Phaeophyta con 14 y la División Chlorophyta con 9 especímenes.

El valor promedio de la concentración de Hg de las macroalgas de esta región es de $0.08 \pm 0.04 \mu\text{g g}^{-1}$, con un máximo de $0.21 \mu\text{g g}^{-1}$ en la estación del Desemboque del Rio Asunción, Sonora (GC-130) en especímenes de *U. lactuca* y en Puerto Libertad, Sonora (GC-131) con la especie *Gracilaria spinigera*. Los valores mínimos que van

desde <LD a $0.02 \mu\text{g g}^{-1}$ se encontraron en especímenes recolectados en las estaciones de Puerto Libertad y Santo Tomas (GC-129), en Sonora con especies como *Gracilaria pacifica*, *Padina durvillae* y *Scinaia jhonstonii*. De acuerdo con su valor de referencia, el valor promedio se encuentra 1.45 veces más enriquecido.

Para el Cd, el valor promedio fue de $2.20 \pm 1.51 \mu\text{g g}^{-1}$, con un máximo de $6.77 \mu\text{g g}^{-1}$ en Puerto Libertad y La Cholla (GC-126) en especímenes de *Scinaia jhonstonii* y *Valoniopsis pachynema*. El mínimo de $0.32 \mu\text{g g}^{-1}$ se observó en especímenes recolectados en estaciones como Puerto Peñasco (GC-127) y Santo Tomas con especies como *Polysiphonia* sp. y *Cladophora albida*. De acuerdo con el valor de referencia, el promedio en esta región se encuentra 44 veces más enriquecido.

El promedio de la concentración de As fue de $5.15 \pm 1.88 \mu\text{g g}^{-1}$, con un valor máximo de $8.86 \mu\text{g g}^{-1}$ en Puerto Peñasco en especímenes de *Sargassum* sp. y un mínimo de $2.49 \mu\text{g g}^{-1}$ en Puerto Libertad con la especie *Gracilaria spinigera*. De acuerdo a su valor de referencia, el valor promedio se encuentra 1.54 veces más enriquecido.

Para las macroalgas de la región 2, las concentraciones de Hg no mostraron diferencias significativas ($p=0.737$) entre dichas divisiones. Para el Cd las rodofitas presentaron las concentraciones más altas ($2.41 \pm 1.53 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco), seguidas de las feofitas ($2.23 \pm 1.20 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) y las clorofitas ($1.61 \pm 1.87 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco), aunque sin encontrarse diferencias significativas ($p=0.13$). Para el As, las feofitas presentaron las concentraciones más altas ($6.33 \pm 2.09 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco), seguidas de las clorofitas ($4.78 \pm 1.67 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) y las rodofitas ($4.50 \pm 1.19 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco), pero sin presentar diferencias significativas ($p=0.147$).

8.4.3. Región 3

En esta región se establecieron 29 estaciones y se recolectaron 304 especímenes de diferentes géneros y división, perteneciendo 72 especímenes a la División Chlorophyta, 126 a la División Phaeophyta y 105 a la División Rhodophyta.

La concentración promedio de Hg fue de $0.33 \pm 0.89 \mu\text{g g}^{-1}$, con un máximo de $6.61 \mu\text{g g}^{-1}$ en la estación de la Bahía de la Paz en especímenes de la especie *G. vermiculophylla* y un mínimo de $0.01 \mu\text{g g}^{-1}$ en estaciones como Mulegé y San Bruno es las especies *Colpomenia* sp., *Sargassum muticum*, *Sargassum* sp., *Padina* sp. y *Dictyota* sp. De acuerdo al valor de referencia, el promedio regional se encuentra 6.0 veces más enriquecido.

Para el Cd el promedio fue de $2.28 \pm 1.83 \mu\text{g g}^{-1}$, presentando un valor máximo de $9.56 \mu\text{g g}^{-1}$ en la estación de San Brunito (GC-87) en organismos de la especie *Colpomenia tuberculata* y un mínimo de $0.02 \mu\text{g g}^{-1}$ en la estación Frente a la mina de la Soledad en la especie *U. acanthophora*. El promedio se encuentra 45.6 veces más enriquecido al del valor de referencia.

Para el As, el valor promedio fue de $4.18 \pm 1.82 \mu\text{g g}^{-1}$, con un máximo de $14.48 \mu\text{g g}^{-1}$ en la estación de Mulege para especímenes de *Zonaria* sp. y un mínimo de $1.38 \mu\text{g g}^{-1}$ en la estación de San Bruno en la especie *Spyridia* sp. Su valor promedio se encuentra 1.25 veces más enriquecido que su valor de referencia.

En general las rodofitas de la región 3, presentan un promedio más alto en la concentración de Hg ($0.49 \pm 1.21 \mu\text{g g}^{-1}$) seguido de las clorofitas ($0.3 \pm 0.82 \mu\text{g g}^{-1}$) y las feofitas ($0.22 \pm 0.27 \mu\text{g g}^{-1}$) sin encontrarse diferencias significativas ($p=0.441$) entre ellas. Para el Cd las feofitas presentaron el valor promedio más alto ($2.72 \pm 2.19 \mu\text{g g}^{-1}$),

seguidas de las rodofitas ($2.33 \pm 1.62 \mu\text{g g}^{-1}$) y las clorofitas ($1.41 \pm 1.19 \mu\text{g g}^{-1}$), siendo estas últimas significativamente diferentes a las feofitas y rodofitas. Para el As, el valor promedio para las feofitas ($5.02 \pm 2.47 \mu\text{g g}^{-1}$) fue significativamente ($p < 0.05$) más altas a las clorofitas ($3.66 \pm 0.66 \mu\text{g g}^{-1}$) y estas sin diferencias con el valor promedio para las rodofitas ($3.60 \pm 1.06 \mu\text{g g}^{-1}$).

8.4.4. Región 4

Dentro de esta región se establecieron 26 puntos de muestreo y se recolectaron un total de 270 especímenes, predominando la División Chlorophyta con 111, seguida de la División Phaeophyta con 82 especímenes y la División Rhodophyta con 77.

El valor promedio de la concentración de Hg fue de $0.17 \pm 0.25 \mu\text{g g}^{-1}$, registrándose un valor máximo de $2.11 \mu\text{g g}^{-1}$ en la estación de El Faro en Mazatlán, Sinaloa (GC-97) con especímenes de *Grateloupia filicina* y un mínimo de $0.01 \mu\text{g g}^{-1}$ en la estación de Cerritos también en Mazatlán (GC-94) en la especie *Hypnea* sp. y en la estación del Puerto de Guaymas, Sonora (GC-134) con *Sargassum* sp. De acuerdo con el valor de referencia para el Hg, su valor promedio en esta región se encuentra 3.4 veces más enriquecido.

Para el Cd su valor promedio de concentración fue de $1.93 \pm 2.11 \mu\text{g g}^{-1}$, con un máximo de $15.83 \mu\text{g g}^{-1}$ en Playa Guadalupe, Sonora (GC-41) en especímenes de *Gigartina* sp. y un valor mínimo de $0.01 \mu\text{g g}^{-1}$ en la estación del Estero de Urias, Mazatlán, Sinaloa (GC-155) para las especies *U. lobata* y *U. intestinalis*. El valor promedio de la concentración de Cd se encuentra 38.6 veces más enriquecido que su valor de referencia.

Para el As su valor promedio de concentración fue de $4.85 \pm 7.3 \mu\text{g g}^{-1}$, obteniéndose un valor máximo de $80.04 \mu\text{g g}^{-1}$ en la estación de Agiabampo, Sonora (GC-26) con la especie *Rhizoclonium implex* y un valor mínimo de 0.17 en la estación de Bahía Lobos, Sonora (GC-43) con la especie *Codium amplivesiculatum*. Su valor de concentración promedio se encuentra 1.44 veces más enriquecido que su valor de referencia.

En relación al Hg, las macroalgas colectadas en la región 4 para la División Rhodophyta ($0.20 \pm 0.35 \mu\text{g g}^{-1}$), Phaeophyta ($0.17 \pm 0.25 \mu\text{g g}^{-1}$) y Chlorophyta ($0.15 \pm 0.17 \mu\text{g g}^{-1}$) no presentan diferencias significativas ($p < 0.490$). Para el Cd la División con la concentración más alta fue Rhodophyta ($2.58 \pm 2.58 \mu\text{g g}^{-1}$), seguida de Phaeophyta ($2.27 \pm 3.3 \mu\text{g g}^{-1}$) y en menor concentración en la División Chlorophyta ($1.17 \pm 1.21 \mu\text{g g}^{-1}$) presentándose diferencias significativas entre todas ($p < 0.05$). Para el As la concentración promedio más alta la presentó la División Chlorophyta ($6.13 \pm 12.23 \mu\text{g g}^{-1}$) seguida de Phaeophyta ($4.57 \pm 2.84 \mu\text{g g}^{-1}$) y Rhodophyta ($3.69 \pm 1.38 \mu\text{g g}^{-1}$), sin embargo debido a la alta variabilidad no presentó diferencias significativas ($p = 0.096$).

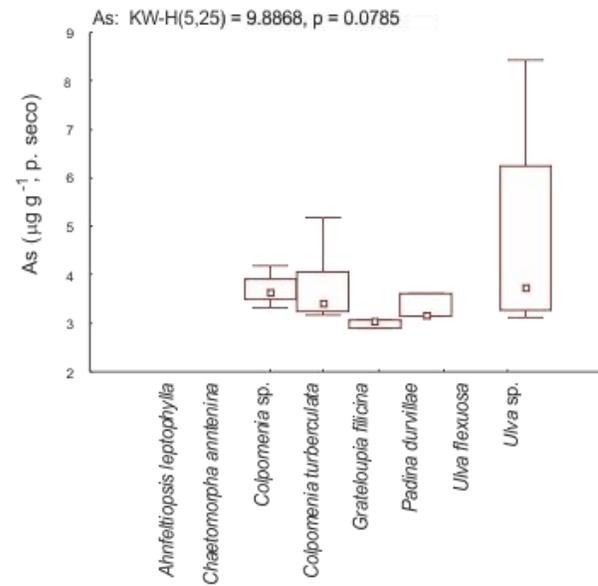
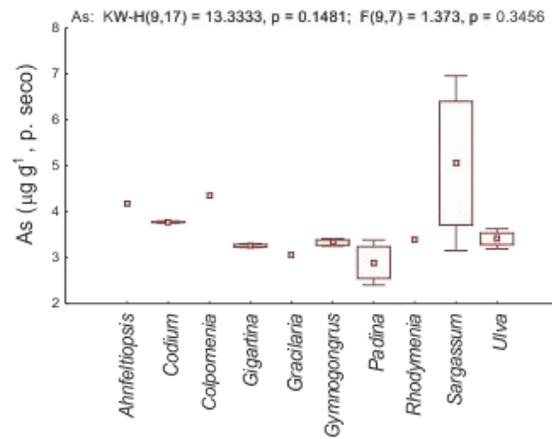
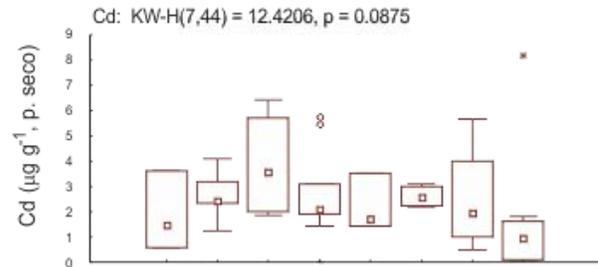
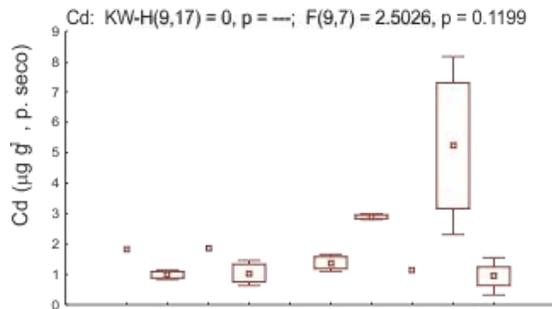
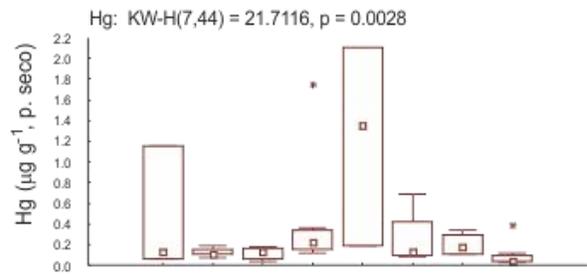
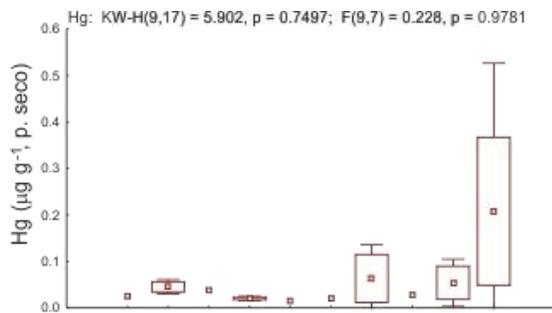
8.5. Comparativos entre especímenes de diferentes especies recolectados en un mismo sitio

Se realizó un análisis comparativo de las concentraciones de Hg, Cd y As en los especímenes de las diferentes especies de macroalgas recolectadas en un mismo sitio. Este análisis permite determinar si especímenes de diferentes géneros y especies

expuestos a un mismo ambiente presentan niveles de concentraciones comparables o diferentes.

Para este ejercicio se seleccionaron diversas estaciones de las diferentes regiones, como lo es la estación de Loreto (GC-77), (Figura 13 (A)) en la región III, donde se obtuvieron 10 géneros con concentración de Hg desde 0.01 a 0.12 $\mu\text{g g}^{-1}$, solo un espécimen presentó niveles fuera del rango (0.68 $\mu\text{g g}^{-1}$). En cuanto a las concentraciones de Cd, los valores variaron de 0.15 – 3.16 $\mu\text{g g}^{-1}$, con un valor fuera de rango (7.31 $\mu\text{g g}^{-1}$). Para los valores de concentración de As, 3.20 – 6.40 $\mu\text{g g}^{-1}$. Ningún género presentó diferencias significativas ($p>0.05$) en ninguno de los metales.

Dentro de la región 4, en la Bahía de Mazatlán (GC-92 al 97), se encontraron 82 especímenes de diferentes especies (Figura 13 (B)), obteniéndose valores de concentración con gran variabilidad para Hg, desde 0.01 a 2.11 $\mu\text{g g}^{-1}$. Se encontraron diferencias significativas ($p<0.05$) para la especie *Chaetomorpha antennina* y el género *Ulva* con *Ahnfeltiopsis leptophylla*, *Colpomenia tuberculata*, *Grateloupia filicina*, *Padina durvillae* y *Ulva flexuosa*. Para las concentraciones de Cd (0.03-10.71 $\mu\text{g g}^{-1}$) y las de As (2.70-8.42 $\mu\text{g g}^{-1}$), no se encontraron diferencias significativas ($p>0.05$).



Género

Especie

(A)

(B)

Figura 13. Comparación de concentraciones de especímenes de diferentes géneros y/o especies recolectados en (A) Loreto, B.C.S. (GC 77) y (B) Mazatlán, Sinaloa (GC-92-

97). □ Promedio □ Promedio±error estandar ▮ Promedio±DE ○ Anómalos

* Extremos

En una estación, San Bruno (GC-81) se compararon especímenes de géneros de las diferentes Divisiones, para sus concentraciones de Cd, observándose los valores más altos en los géneros de *Padina* y *Sargassum* y los valores más bajos en los especímenes del género *Ulva*. En la Figura 14 se observan los valores de la capacidad máxima de bioabsorción (q_{max}) de algunas especies de estos géneros (Patrón-Prado et al., 2011), encontrándose, a excepción del género *Ulva*, similar al promedio de las concentraciones obtenidas en este estudio.

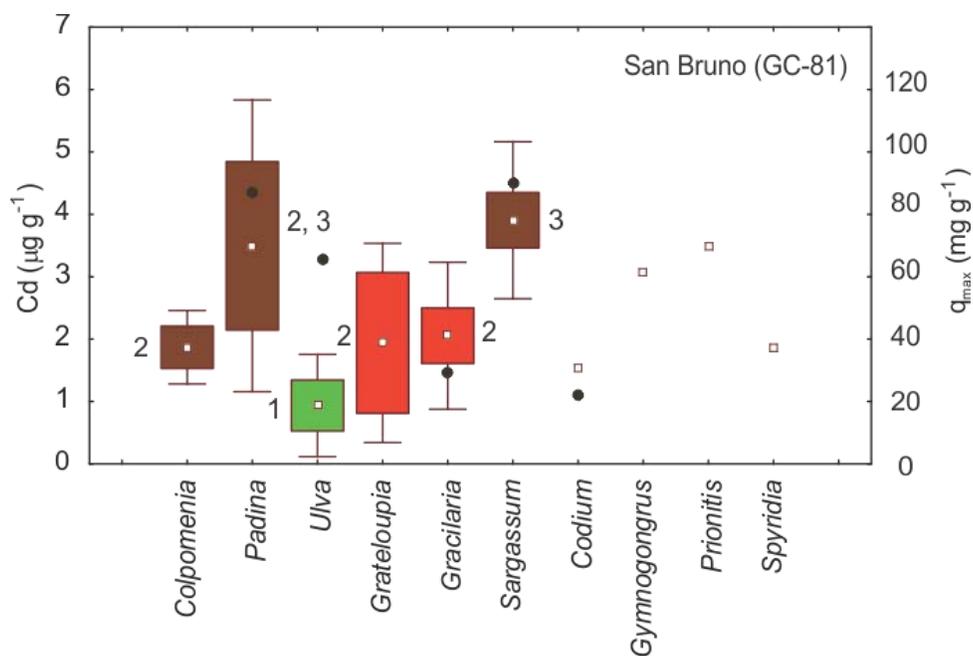


Figura 14. Concentración de Cd ($\mu\text{g g}^{-1}$, peso seco), para diferentes géneros de macroalgas recolectadas en un mismo sitio (San Bruno, GC-81) y, con un punto negro, su valor máximo de absorción (q_{max}) para especies del mismo género. Los números nos indican los géneros que no tienen diferencias significativas entre si.

Al compararse diferentes especies de macroalgas dentro de un mismo sitio (El Huerfanito-El Bufe) (Figura 15), se observa que los valores de concentración más altos para los tres elementos fueron encontrados en las especie *Sargassum johnstonii*. Aunque se presentaron diferencias significativas ($p > 0.05$) para el Cd para *Colpomenia tuberculata* y *Laurencia pacifica*, siendo menores a *Sargassum johnstonii*. Se observan concentraciones bajas de As para la especie *L. pacifica*, aunque no presenta diferencias significativas con el resto ($p > 0.05$).

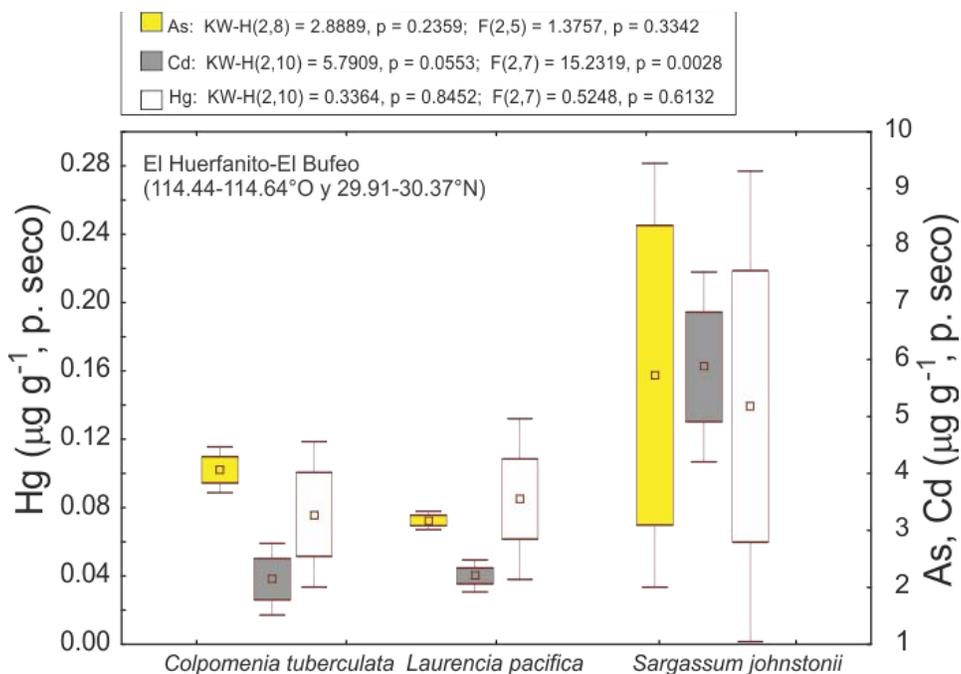


Figura 15. Concentración de Hg, Cd y As ($\mu\text{g g}^{-1}$, peso seco), para diferentes especies de macroalgas, recolectadas en un mismo sitio (El Huerfanito-el Bufe).

8.6 Comparativos entre especímenes de mismas especies recolectadas en diferentes sitio

En el segundo análisis se compararon los niveles de concentración de Hg, Cd y As en especímenes de un mismo género recolectados en diferentes sitios. El propósito fue verificar si la concentración de los elementos estudiados se incrementa o disminuye en función con el grado de exposición de las macroalgas. Para tal propósito se construyeron gráficos de barras y bigotes representando la latitud vs concentración de cada metal en las macroalgas de una misma especie.

Igualmente se realizaron graficas para todos los especímenes recolectados a lo largo de las costas de Sinaloa-Sonora y en la península de Baja California. Las concentraciones de Hg en su mayoría son comparables o ligeramente superiores al valor de referencia encontrado en este estudio ($0.055 \pm 0.03 \mu\text{g g}^{-1}$) (Figura 16); sin embargo, se observaron sitios altamente impactados con concentraciones de hasta $6.6 \mu\text{g g}^{-1}$, como los son Santa María-La Reforma (GC-157) y la Bahía de Mazatlán (GC-92-97) en las costas de Sinaloa y en la Bahía de la Paz (GC-74) en las costas de BC. Para los valores de concentración de Cd (Figura 17), en las costas de Sonora y Sinaloa se observó alta variabilidad, teniéndose sitios con alta concentración ($>5.0 \mu\text{g g}^{-1}$, peso seco), tales como Puerto Peñasco (GC-127), Puerto de Guaymas (GC-134), Ohuira-Topolobampo (GC-159), Santa María-La Reforma (GC-157) y la Bahía de Mazatlán (GC-92-97). En las costas de BC, también se encontró alta variabilidad con valores $>5.00 \mu\text{g g}^{-1}$ en la Bahía de los Ángeles (GC-109-111), Santa Rosalía (GC-79) y Bahía de la Paz (GC-74). Dentro de todas las costas del Golfo de California se

tuvieron valores en su mayoría superiores al valor de referencia encontrado para dicho elemento ($0.05 \pm 0.03 \mu\text{g g}^{-1}$).

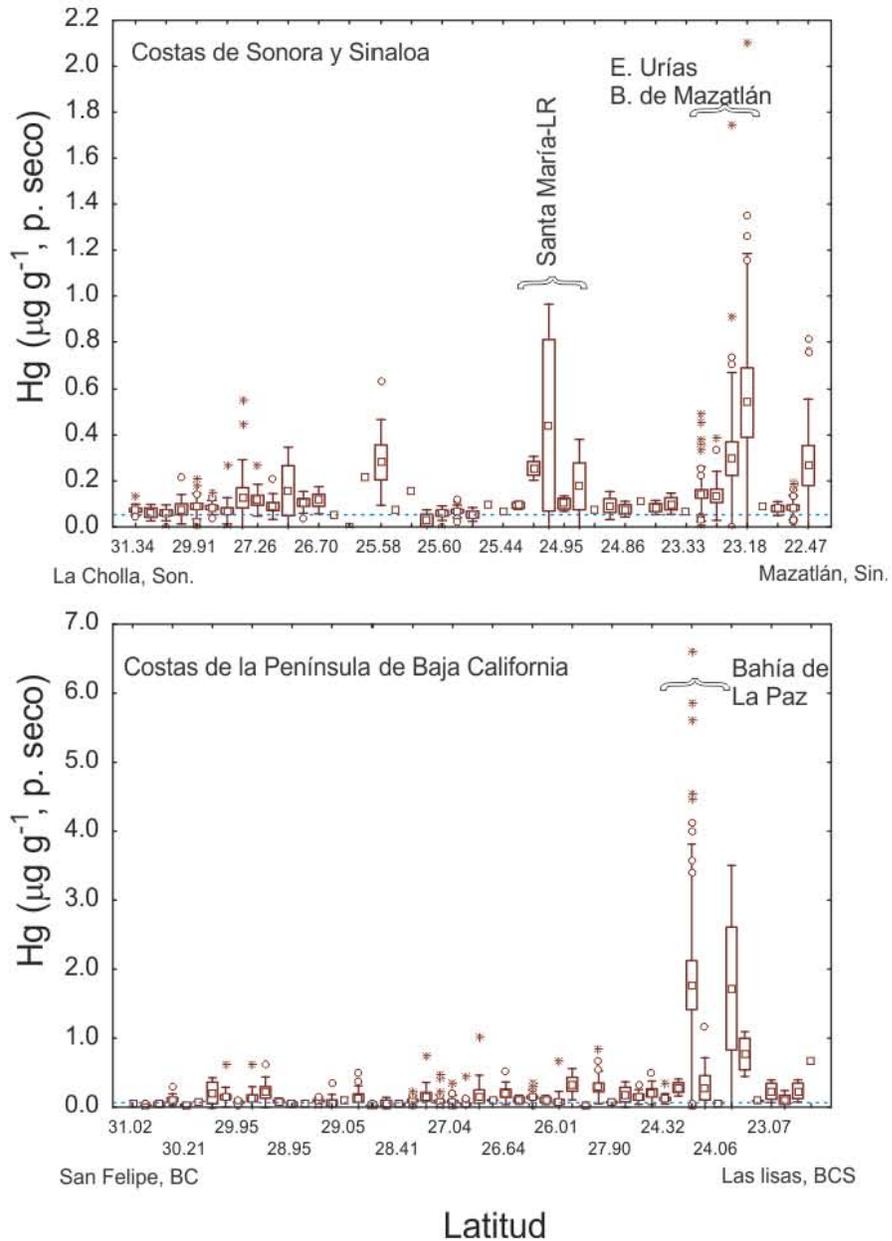


Figura 16. Concentración de Hg ($\mu\text{g g}^{-1}$, peso seco), para todos los especímenes recolectados en las costas del Golfo de California. . \square Promedio \square Promedio \pm error estandar \perp Promedio \pm DE \circ Anómalos * Extremos

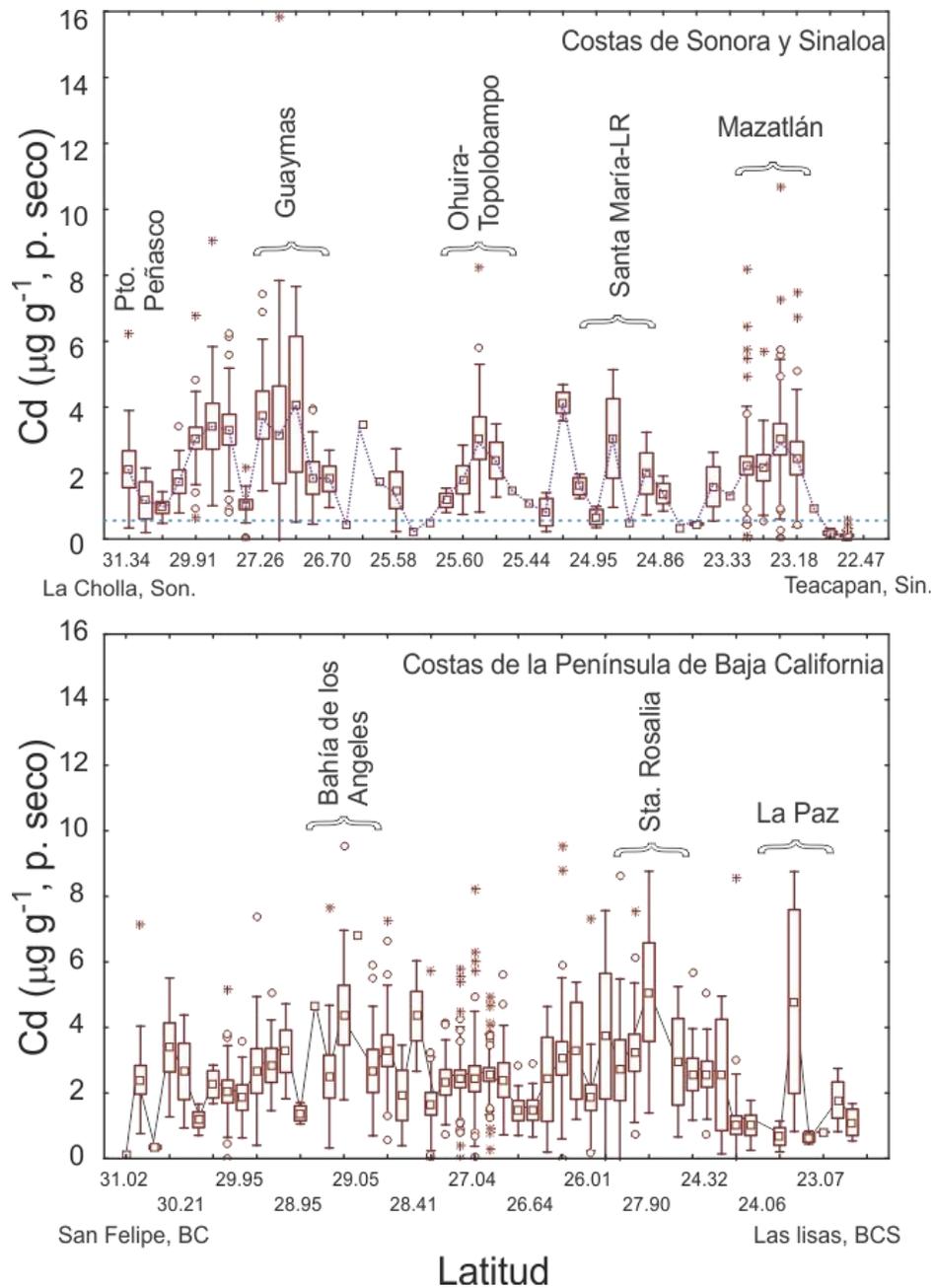


Figura 17. Concentración de Cd ($\mu\text{g g}^{-1}$, peso seco), para todos los especímenes recolectados en las costas del Golfo de California. . \square Promedio \square Promedio \pm error estandar \perp Promedio \pm DE \circ Anómalos * Extremos

Según los resultados se observó que los valores de As, presentan un mismo rango de concentración dentro del Golfo de California (Figura 18) presentando valores extremos en lugares como Playa San José y Bahía de Mazatlán, en las costas de Sonora y Sinaloa, al igual que en Punta Chivato y Bahía de la Paz en las costas de BC.

En las costas de BC, encontramos los géneros *Colpomenia* y *Sargassum* los más frecuentemente presentes en los sitios de muestreo, por lo que se seleccionaron para representar su variabilidad latitudinal. Al compararlos para cada uno de los elementos, encontramos que, en cuanto a los valores de concentración de As (Figura 19) en especímenes del género *Colpomenia* presentan una aparente tendencia a aumentar hacia latitudes más bajas, mientras que el género *Sargassum* presenta gran variabilidad en sus concentraciones a lo largo de todas las latitudes de las costas de BC.

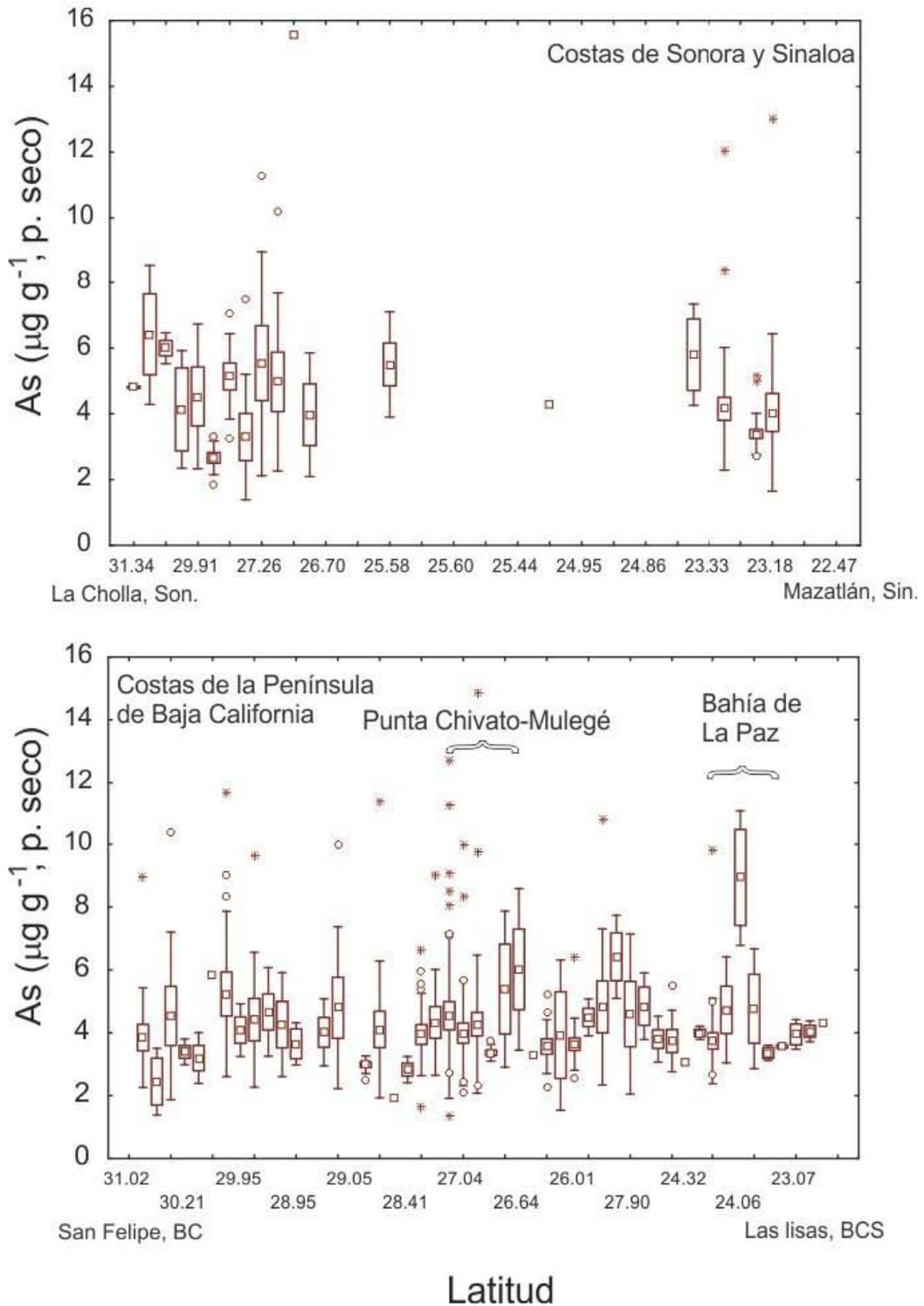


Figura 18. Concentración de As ($\mu\text{g g}^{-1}$, peso seco), para todos los especímenes recolectados en las costas del Golfo de California.

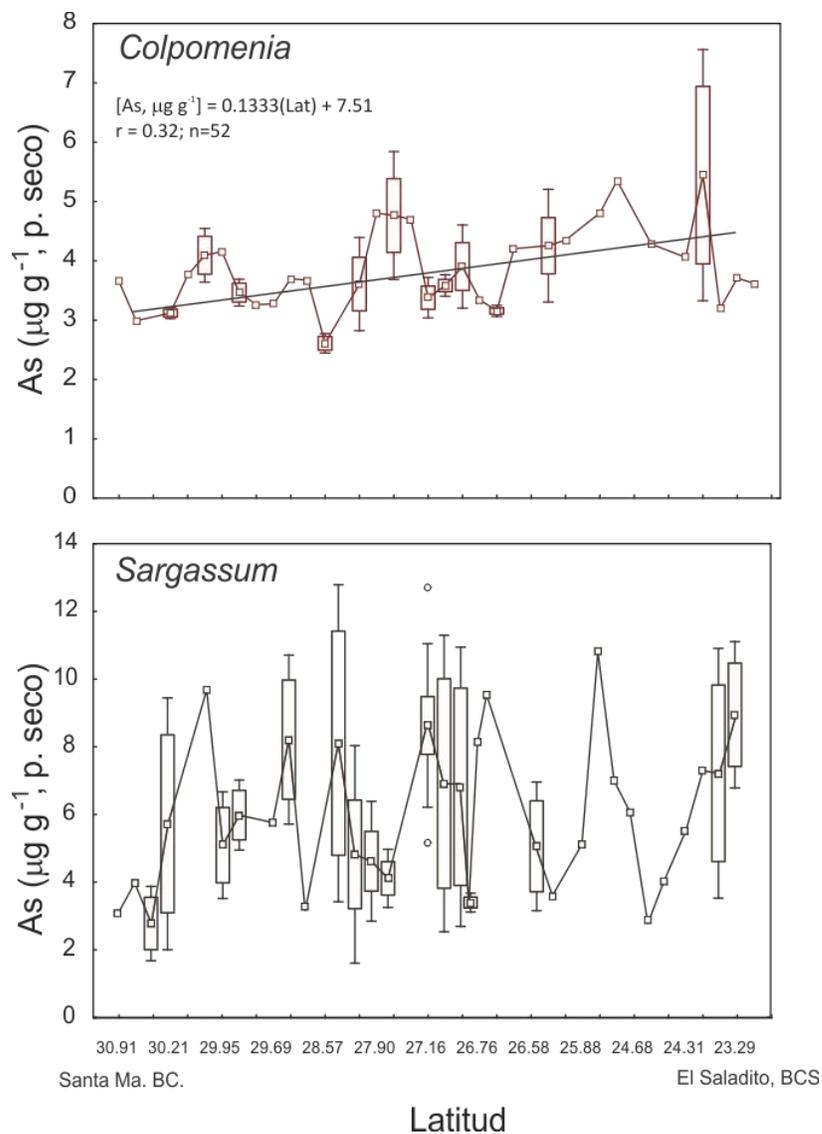


Figura 19. Concentración de As ($\mu g g^{-1}$, peso seco), en las diferentes latitudes de las costas de BC, para los géneros *Colpomenia* y *Sargassum*.

En cuanto a las concentraciones de Cd, en especímenes de los géneros *Colpomenia* y *Sargassum* (Figura 20); se presenta una alta variabilidad teniendo valores más altos el género *Sargassum*. No se observa similitud en la distribución latitudinal de los resultados de Cd en ambos géneros.

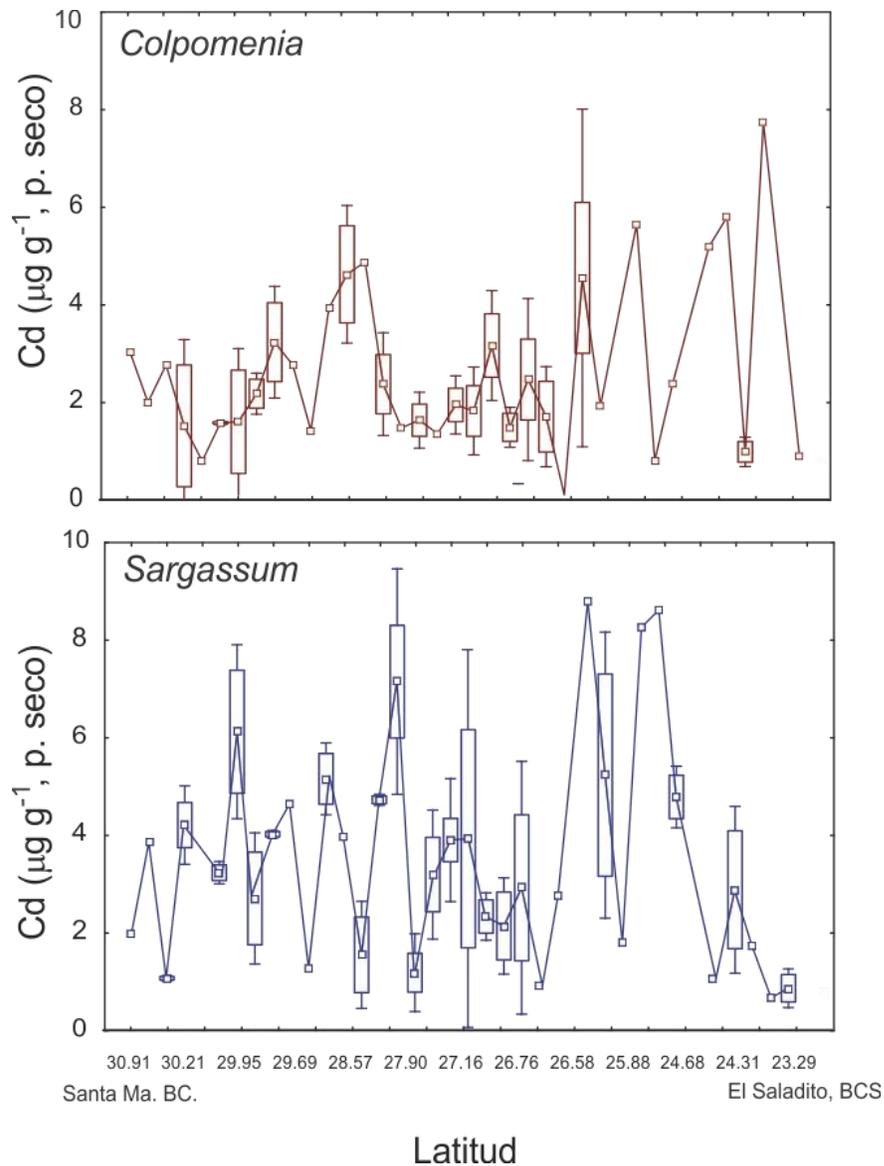


Figura 20. Concentración de Cd ($\mu\text{g g}^{-1}$, peso seco), en las diferentes latitudes de las costas de BC, para los géneros *Colpomenia* y *Sargassum*.

Las concentraciones de Hg en los géneros *Colpomenia* y *Sargassum* (Figura 21) fueron bajas en las latitudes altas y muy altos ($>0.6 \mu\text{g g}^{-1}$) en las latitudes bajas, en particular para el género *Colpomenia*. Ambos géneros expresaron similitud en la tendencia de los valores obtenidos para este elemento.

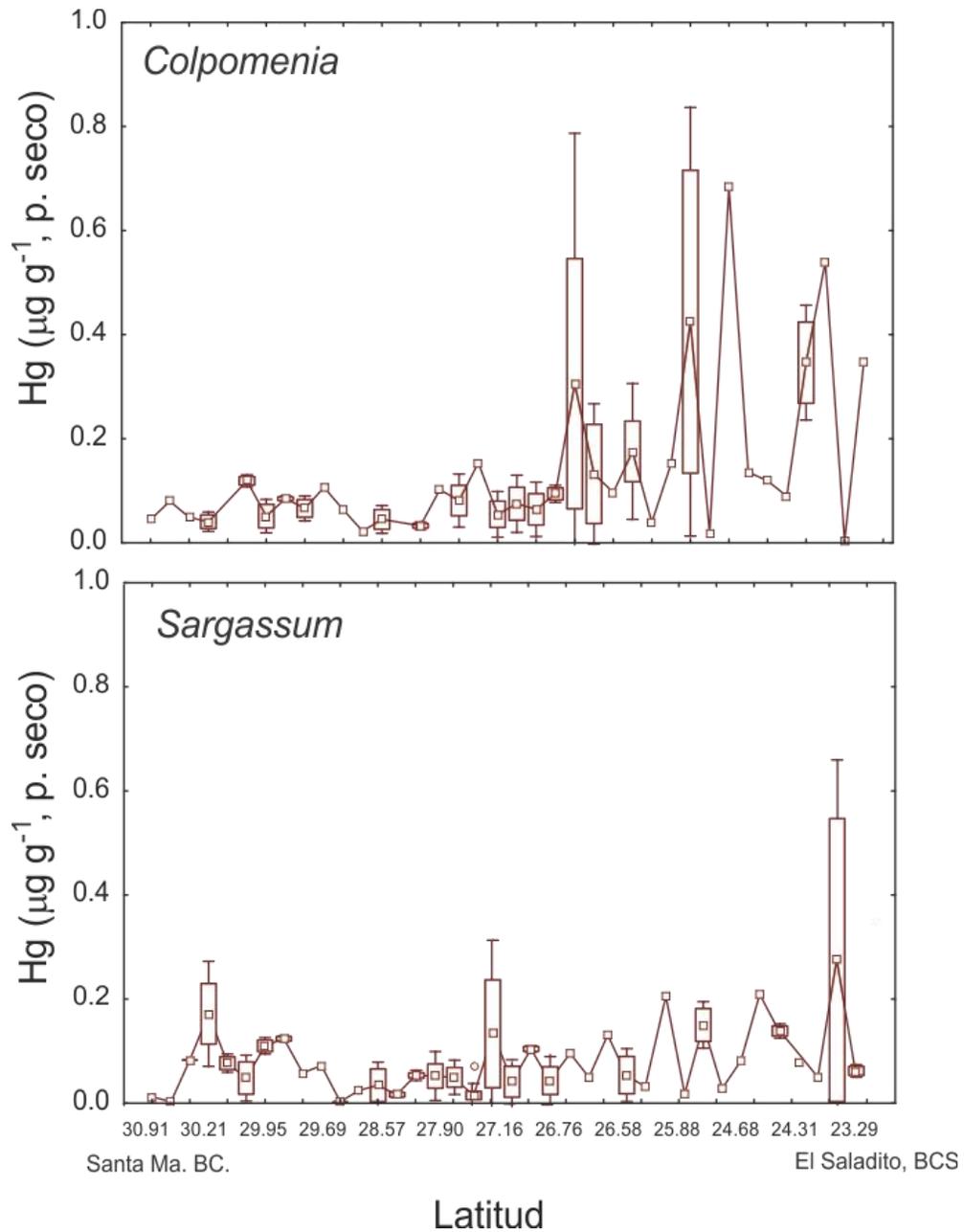


Figura 21. Concentración de Hg ($\mu\text{g g}^{-1}$, peso seco), en las diferentes latitudes de las costas de BC, para los géneros *Colpomenia* y *Sargassum*.

Los diferentes especímenes del género *Ulva*, en las costas de BC, tienden a comportarse de una forma uniforme, exceptuando sitios con concentraciones altas o

bajas para As (Figura 22). Se encontraron dos sitios con concentraciones más bajas que el resto, que fueron Santa María (GC-122) y Playa Ligui (GC-75B) en BCS, al igual que un punto extremo ubicado en Playa Notri (GC-76). Para las concentraciones de Cd en las costas de BC (Figura 22) se encontró alta variabilidad entre los valores, teniendo puntos donde se encuentran valores altos ($5.05-9.55 \mu\text{g g}^{-1}$) en comparación con el resto de los especímenes, siendo estos sitios, El Barril (GC-105), Bahía de los Ángeles (GC-109-111) y Playa Notri (GC-76). Para las concentraciones de Hg (Figura 22) estos presentaron poca variabilidad con pocos sitios distintos como la Alfonsina (GC-114) con valores de $0.45 \mu\text{g g}^{-1}$, Loreto (GC-77) y Punta Coyote (GC-54) con valores hasta $0.68 \mu\text{g g}^{-1}$. Sin embargo, en Bahía de la Paz (GC-74) y Playa el Tesoro (GC-57) se encontraron valores dentro de un rango muy amplio ($0.03-4.48 \mu\text{g g}^{-1}$), con máximos muy por encima a todos los encontrados a lo largo de la península de BC. Al comparar la especie *U. lactuca* a lo largo de las estaciones de la península de BC, se observó uniformidad en las concentraciones de As, presentando un solo punto (Santa María, GC-122) por debajo del promedio de los demás valores encontrados. Para las concentraciones de Cd solo dos puntos presentan valores más elevados ($3.09-3.71 \mu\text{g g}^{-1}$) que el resto, estos son en Santa Rosalía (GC-79) y Mulegé (GC-83), presentando una uniformidad en el resto de los valores de los especímenes. Las concentraciones de Hg obtenidas de la macroalgas recolectadas fueron de valores uniformes con excepción de Bahía de la Paz, donde se encontraron valores hasta de $4.48 \mu\text{g g}^{-1}$.

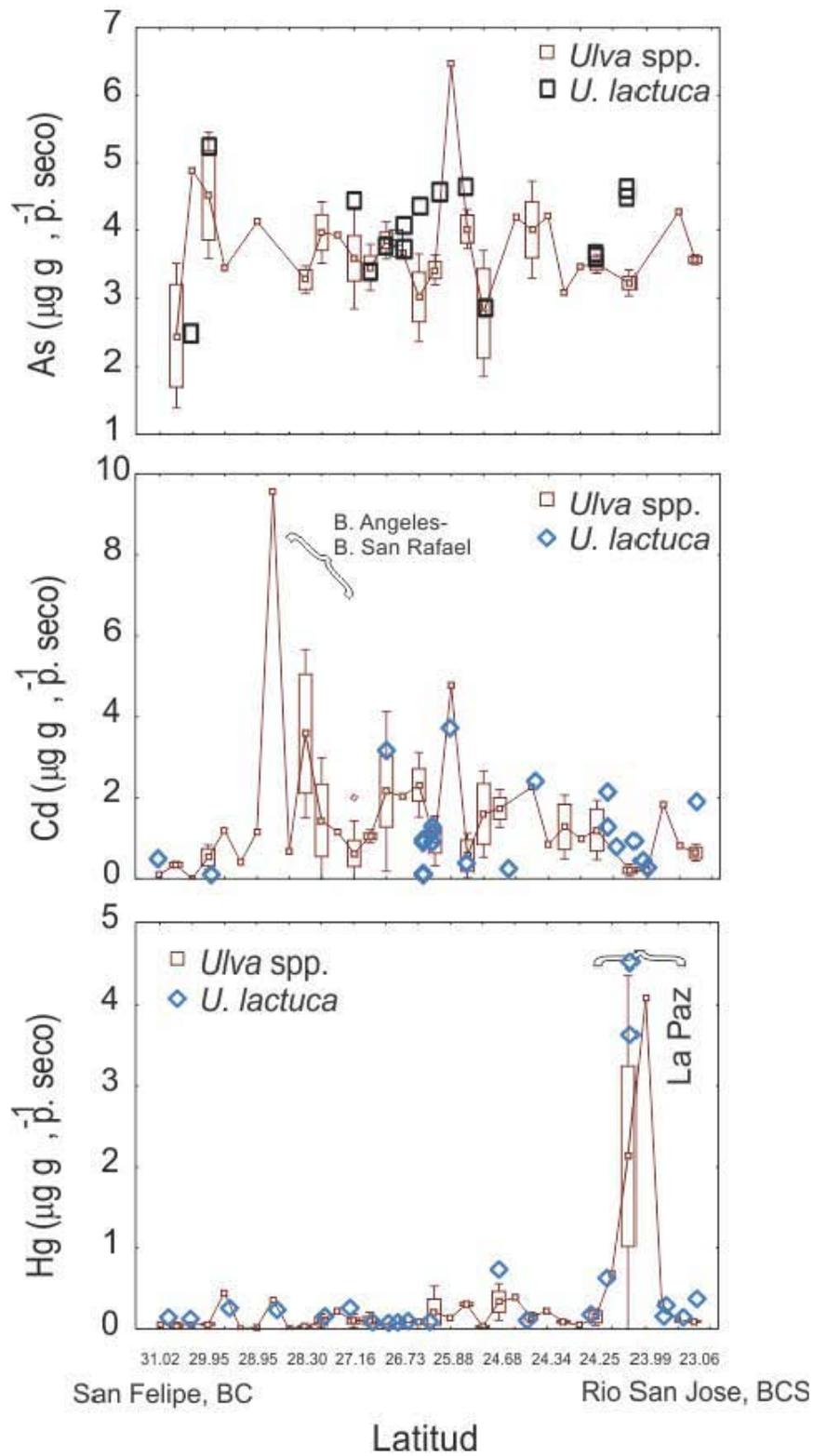


Figura 22. Concentración de Hg, Cd y As ($\mu\text{g g}^{-1}$, peso seco), en especímenes del género *Ulva* y la especie *U. lactuca* en la península de Baja California.

Al comparar a los especímenes del género *Ulva* en las costas de Sonora y Sinaloa (Figura 23), encontramos que en las costas de la Bahía de Mazatlán se recolectaron los organismos con las más altas concentraciones de los tres elementos. La tendencia latitudinal para los tres elementos fue muy similar a lo largo de toda la costa de Sonora y Sinaloa, con muy pocos valores fuera de los rangos para cada uno de dichos elementos.

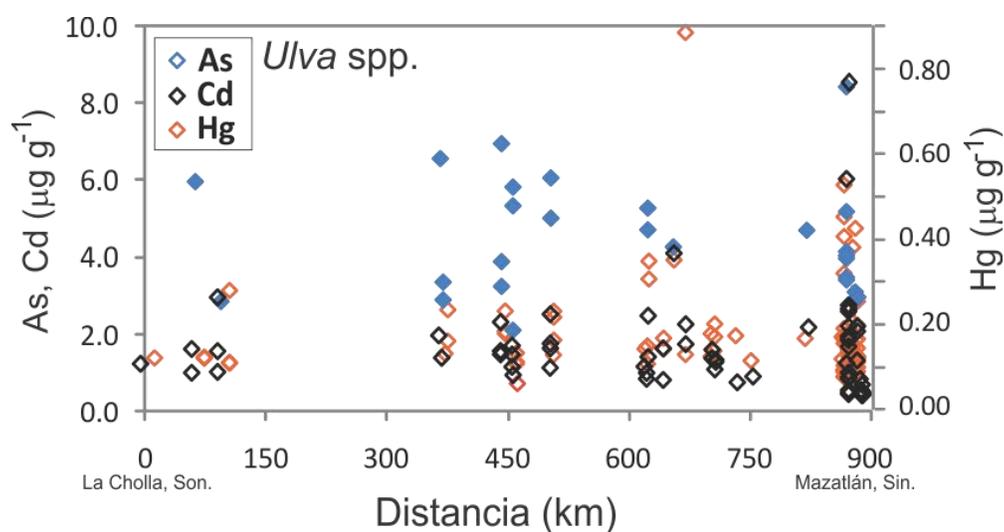


Figura 23. Concentración de Hg, Cd y As ($\mu\text{g g}^{-1}$, peso seco), en especímenes del género *Ulva* y la especie *U. lactuca* muestreadas en las costas de Sonora y Sinaloa.

8.7 Metales en las lagunas costeras de Sinaloa

Dentro de las seis estaciones de colecta establecidas en la zona costera de Sinaloa, se obtuvieron 126 especímenes de los cuales 59 son clorofitas, 15 feofitas y 52 rodofitas. La concentración promedio de Hg fue de $0.08 \pm 0.03 \mu\text{g g}^{-1}$, con un máximo de $0.81 \mu\text{g g}^{-1}$ en la estación de Santa María en *Ulva lactuca*, y un mínimo de $0.01 \mu\text{g g}^{-1}$ en Navachiste y Mapawi con la especie *G. vermiculophylla*. De acuerdo con la

Figura 24, alrededor del 50% de las muestras están dentro del rango de concentración de 0.06-0.1 $\mu\text{g g}^{-1}$. En general las clorofitas ($0.11\pm 0.11 \mu\text{g g}^{-1}$) y las feofitas ($0.09\pm 0.03 \mu\text{g g}^{-1}$) presentan una concentración promedio significativas más alta que las rodofitas ($0.06\pm 0.04 \mu\text{g g}^{-1}$) ($p < 0.05$).

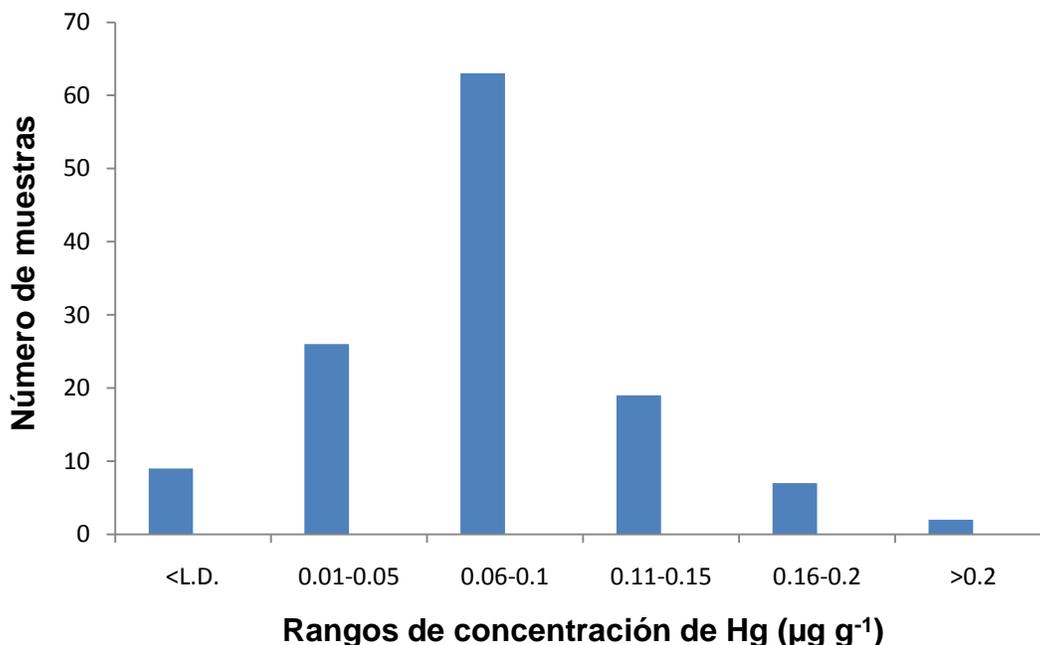


Figura 24. Número de especímenes analizados de acuerdo al rango de concentración de Hg en $\mu\text{g g}^{-1}$ para las lagunas costeras de Sinaloa. LD=0.006 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco.

Para el Cd su valor de concentración promedio fue de $1.31\pm 1.63 \mu\text{g g}^{-1}$, obteniéndose un valor máximo de $10.88 \mu\text{g g}^{-1}$ en la estación de Navachiste con la especie *Spyridia filamentosa*, y un mínimo de $0.05 \mu\text{g g}^{-1}$ en las estaciones de El Colorado y Urias con la especie *G. vermiculophylla*. De acuerdo a la Figura 25, alrededor del 65% de las muestras analizadas están dentro del rango que va desde $0.22 - 2.05 \mu\text{g g}^{-1}$, presentando alrededor del 2% de las muestras los promedios más

bajos. Las feofitas presentaron el valor promedio de concentración más alto ($2.37 \pm 1.63 \mu\text{g g}^{-1}$) en comparación con las rodofitas ($1.75 \pm 2.09 \mu\text{g g}^{-1}$) y las clorofitas ($0.64 \pm 0.52 \mu\text{g g}^{-1}$), pero con diferencias significativas ($p < 0.05$) solo para las clorofitas con las feofitas y las rodofitas.

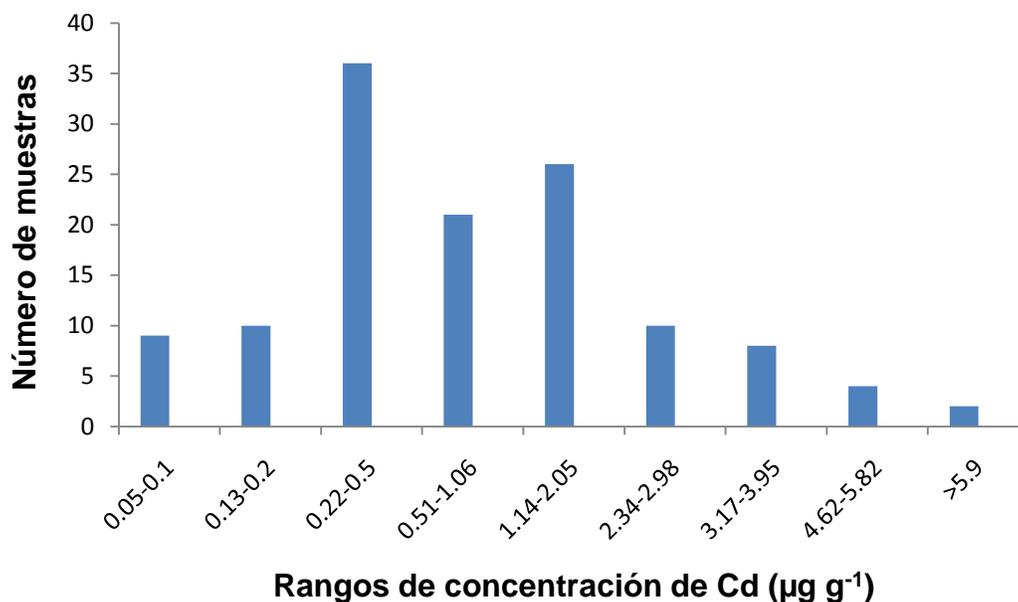


Figura 25. Número de especímenes analizados de acuerdo al rango de concentración de Cd en $\mu\text{g g}^{-1}$ para las lagunas costeras de Sinaloa. LD= $0.002 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco.

8.7.1. Variabilidad temporal del Hg y Cd en las Lagunas costeras de Sinaloa: secas vs lluvias

El promedio general de las concentraciones de Hg de los especímenes recolectados durante la temporada de secas fue $0.10 \pm 0.11 \mu\text{g g}^{-1}$, mientras que para la temporada de lluvias fue de $0.08 \pm 0.04 \mu\text{g g}^{-1}$ sin diferencias significativas ($p=0.297$). Para el Cd las concentraciones de secas fue de $1.66 \pm 1.58 \mu\text{g g}^{-1}$ y las de lluvias fue de $1.00 \pm 1.63 \mu\text{g g}^{-1}$, siendo significativa menor ($p < 0.05$) la concentración de Cd en temporada de lluvias.

Las especies *G. vermiculophylla* y *Caulerpa sertularioides* son las más frecuentes en las temporadas de secas y lluvias en todas las lagunas, aunque con una mayor frecuencia de aparición en la temporada de lluvias que en secas. Al realizar un análisis comparativo de las concentraciones de elementos para las dos especies entre las dos temporadas, no se observaron diferencias significativas ($p > 0.05$) para las concentraciones de Hg (Figura 26) ni para el Cd (Figura 27).

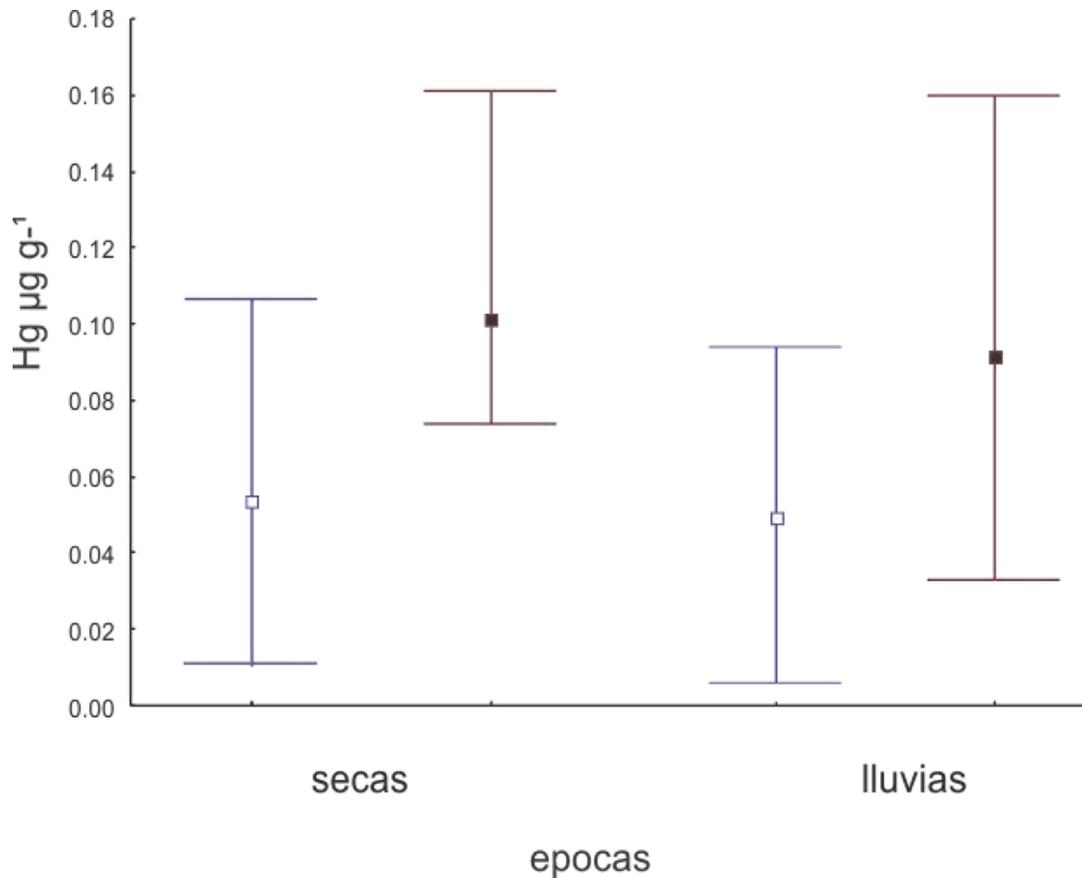


Figura 26. Concentración de Hg ($\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) para la diferentes épocas de las especies *Caulerpa sertularioides* y *Gracilaria vermiculophylla* en las lagunas costeras de Sinaloa. □ Mediana ⊥ Desviación estándar ○ Anómalos * Extremos

■ *Caulerpa* Hg: KW-H(1,34) = 0.56, p = 0.4543; F(1,32) = 0.8153, p = 0.3733

□ *Gracilaria* Hg: KW-H(1,21) = 0.6818, p = 0.4090; F(1,19) = 1.1681, p = 0.2933

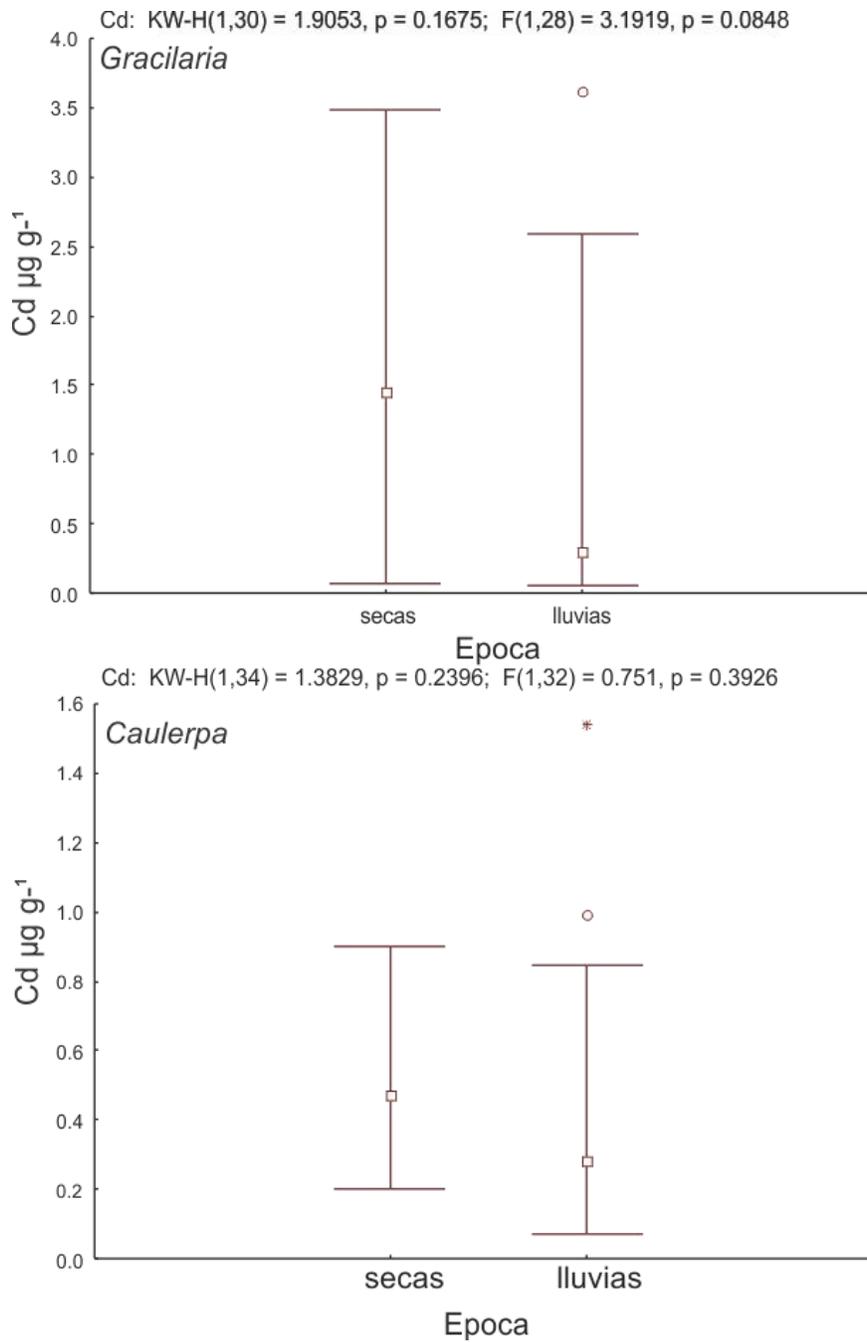


Figura 27. Concentración de Cd ($\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) para la diferentes épocas de las especies *Caulerpa sertularioides* y *Gracilaria vermiculophylla* en las lagunas costeras de Sinaloa. \square Mediana \perp Desviación estándar \circ Anómalos * Extremos

8.8. Hg y Cd en macroalgas del Estero de Urías

Como fue señalado en los métodos, se realizó un estudio más detallado en el Estero de Urías con el fin de estudiar la variabilidad estacional (mensual por un año) y espacial (19 estaciones dentro del ecosistema) de los contenidos de metales (Hg y Cd) en macroalgas. En las 19 estaciones establecidas en el Estero de Urías se recolectaron un total de 441 especímenes, predominando la división Chlorophyta con 258, seguida de la Rhodophyta con 159 y la Phaephyta con 24.

La concentración promedio de Hg fue $0.24 \pm 0.49 \mu\text{g g}^{-1}$ con un máximo de $5.46 \mu\text{g g}^{-1}$ en Junio -09 en la UR4 para *G. vermiculophylla* y un mínimo de $0.01 \mu\text{g g}^{-1}$ durante febrero-10 en la UR12 en *Ulva lobata*, en octubre y noviembre-09 en la UR12 y UR16 para *G. vermiculophylla* y *Grateloupia filicina*. De acuerdo con la Figura 28 alrededor del 90% de todas las muestras están en el rango de 0.01 a $0.59 \mu\text{g g}^{-1}$ mientras que el 10% restante tuvieron valores más altos. El rango con mayor número de muestras es el comprendido entre 0.05-0.09 $\mu\text{g g}^{-1}$.

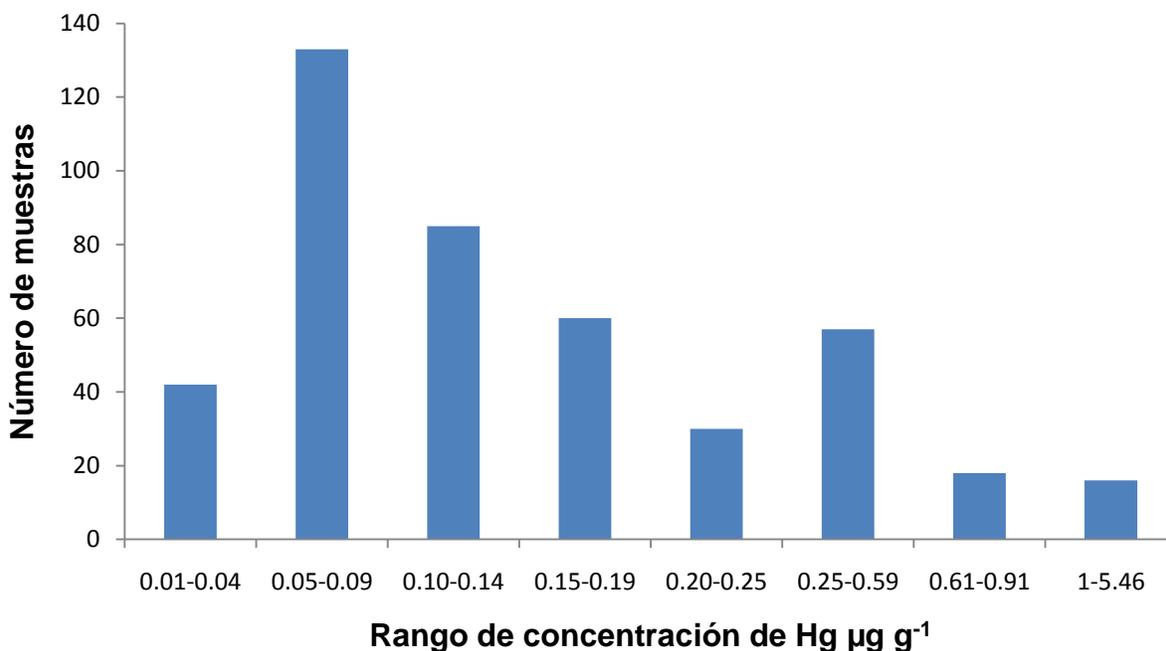


Figura 28. Número de especímenes analizados de acuerdo al rango de concentración de Hg en $\mu\text{g g}^{-1}$ para el Estero de Urias. LD=0.006 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco.

De acuerdo con la Figura 29, las feofitas presentaron la concentración promedio más alta ($0.27 \pm 0.27 \mu\text{g g}^{-1}$), seguidas de las rodofitas ($0.25 \pm 0.58 \mu\text{g g}^{-1}$) y clorofitas ($0.23 \pm 0.44 \mu\text{g g}^{-1}$), habiendo diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las feofitas con las rodofitas y las clorofitas. Las rodofitas presentaron los valores extremos más altos con la especie *G. vermiculophylla* en junio-09 en la UR5 y las feofitas los valores extremos más bajos con la especie *Ectocarpus simulans* en Marzo-10 en la UR9 (Tabla 7).

El promedio de concentración de Cd fue de $0.35 \pm 0.57 \mu\text{g g}^{-1}$, con un valor máximo de $6.38 \mu\text{g g}^{-1}$ con la especie *Ectocarpus simulans* ubicado en la UR17 recolectada en Febrero-09 y con un valor mínimo de $0.01 \mu\text{g g}^{-1}$ para las especies *Grateloupia filicina* y *G. howeii*, *G. vermiculophylla*, *U. lactuca*, *U. intestinalis* y *U. lobata*, localizadas principalmente en las UR17 y UR16 durante los meses de abril-2009

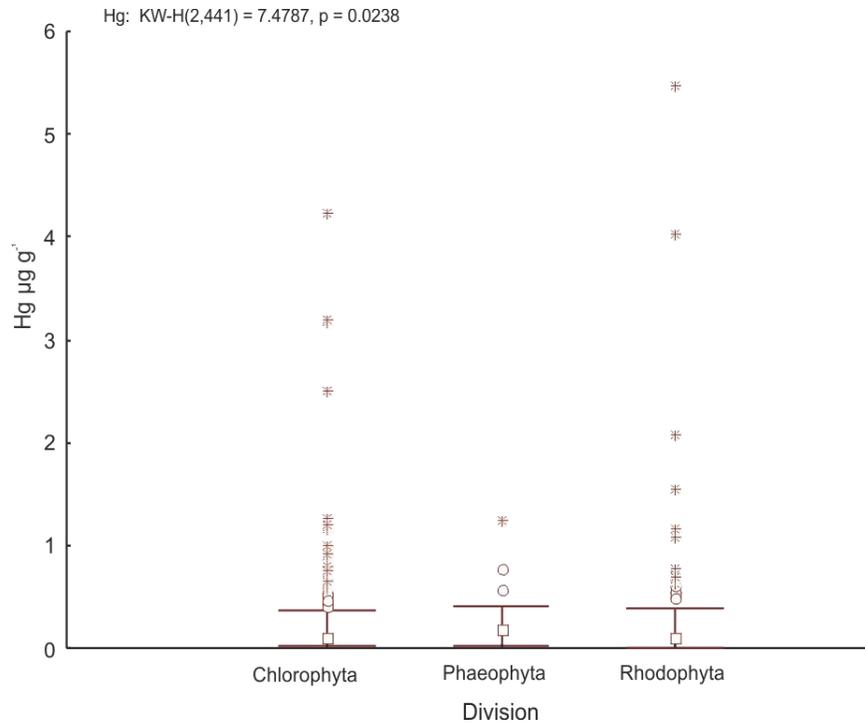


Figura 29. Concentración de Hg ($\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) anómalos y extremos, de cada división de las macroalgas del Estero de Urias. \square Mediana \perp Desviación estándar \circ Anómalos * Extremos

hasta marzo-2010.

De acuerdo con la Figura 30 alrededor del 21% de las muestras se encuentra en el rango que varía de $0.20\text{-}0.47 \mu\text{g g}^{-1}$ siendo este el que presenta el mayor número de muestras. Las concentraciones bajas se encuentran en un rango comprendido entre $0.01\text{-}0.09 \mu\text{g g}^{-1}$

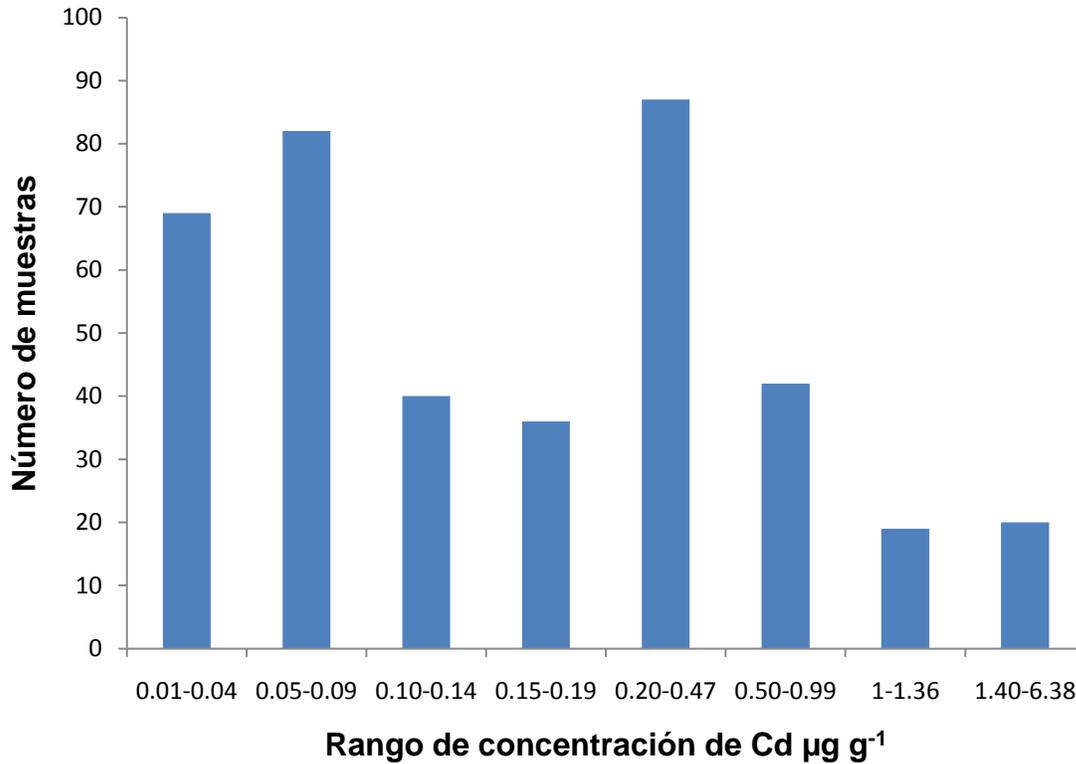


Figura 30. Número de especímenes analizados de acuerdo al rango de concentración de Cd en $\mu\text{g g}^{-1}$ para el Estero de Urías. LD=0.002 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco.

La concentración promedio de las feofitas fue de $0.64 \pm 1.37 \mu\text{g g}^{-1}$, seguida de las clorofitas ($0.35 \pm 0.49 \mu\text{g g}^{-1}$) y las rodofitas ($0.30 \pm 0.43 \mu\text{g g}^{-1}$), habiendo diferencias significativas ($p < 0.05$) solo entre las feofitas y rodofitas (Figura 31). Los valores extremos más altos fueron obtenidos por las feofitas ($6.38 \mu\text{g g}^{-1}$) para la especie *Ectocarpus simulans* durante febrero-09, en la UR17 y los extremos más bajos fueron de las rodofitas ($2.32 \mu\text{g g}^{-1}$) con la especie *Polysiphonia pacifica*, durante Junio-09 en la UR14.

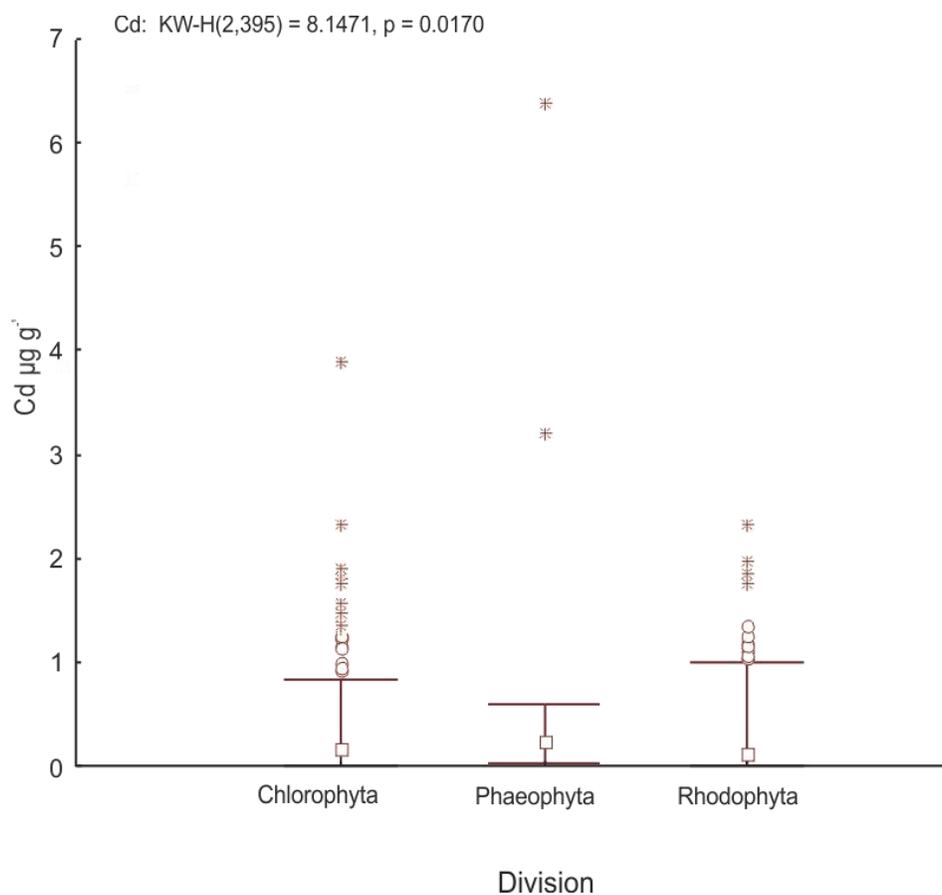


Figura 31. Concentración de Cd ($\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) anómala y extrema, de cada división de las macroalgas del Estero de Urias. \square Mediana — Desviación estándar \circ Anómalos * Extremos

Tabla 7. Promedio±sd, mediana (percentiles 25-75%) por división de las macroalgas del Estero de Urías recolectadas desde Febrero- 09 a Marzo-10. Pruebas realizadas: *Kruskal-Wallis y **Dunn.

DIVISION	N	PROMEDIO±SD**	CV	MERCURIO				n	PROMEDIO±SD**	CV	CADMIO		
				MAX	MIN	MEDIANA	MAX				MIN	MEDIANA	
CHLOROPHYTA	258	0.23±0.44	190	4.24	0.01	0.11 (0.072-0.199)	234	0.35±0.49	140	3.88	0.01	0.167(0.065-0.382)	
PHAEOPHYTA	24	0.27±0.27	99	1.25	0.02	0.19(0.125-0.297)	24	0.64±1.37	213	6.38	0.03	0.247(0.163-.430)	
RHODOPHYTA	159	0.25±0.58	227	5.46	0.01	0.111(0.067-0.204)	137	0.30±0.43	141	2.32	0.01	0.112(0.054-0.445)	

8.8.1. Variabilidad espacial en las concentraciones de Hg y Cd en macroalgas del Estero de Urias y sus fuentes potenciales

Para las concentraciones de Hg obtenidas de acuerdo a su fuente de aporte, se observó que la mayoría de los valores extremos fueron obtenidos en las estaciones asociados con la fuente industrial y en la zona denominada Urbano-Agrícola-Granja (U-A-G). Las menores concentraciones se encontraron en las macroalgas recolectadas en el ambiente marino (cerca de la boca y fuera del sistema lagunar). Se observaron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre A-U con U-A-G y Granja-urbano, así como en Industrial con U-M-Canal y Urbano. Además entre Lagunar-Mezcla con U-M-Canal y Urbano, Marino con U-M-Canal y urbano, U-A-G con U-M-Canal y urbano, U-M-Canal con zona portuaria y urbano con zona portuaria (Figura 32).

Para las concentraciones de Cd, los extremos más altos se encontraron en las estaciones donde hay aporte U-M-Canal, encontrándose diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las fuentes A-U con U-A-G, Industrial con Granja, Granja con Lagunar-Mezcla y U-A-G.

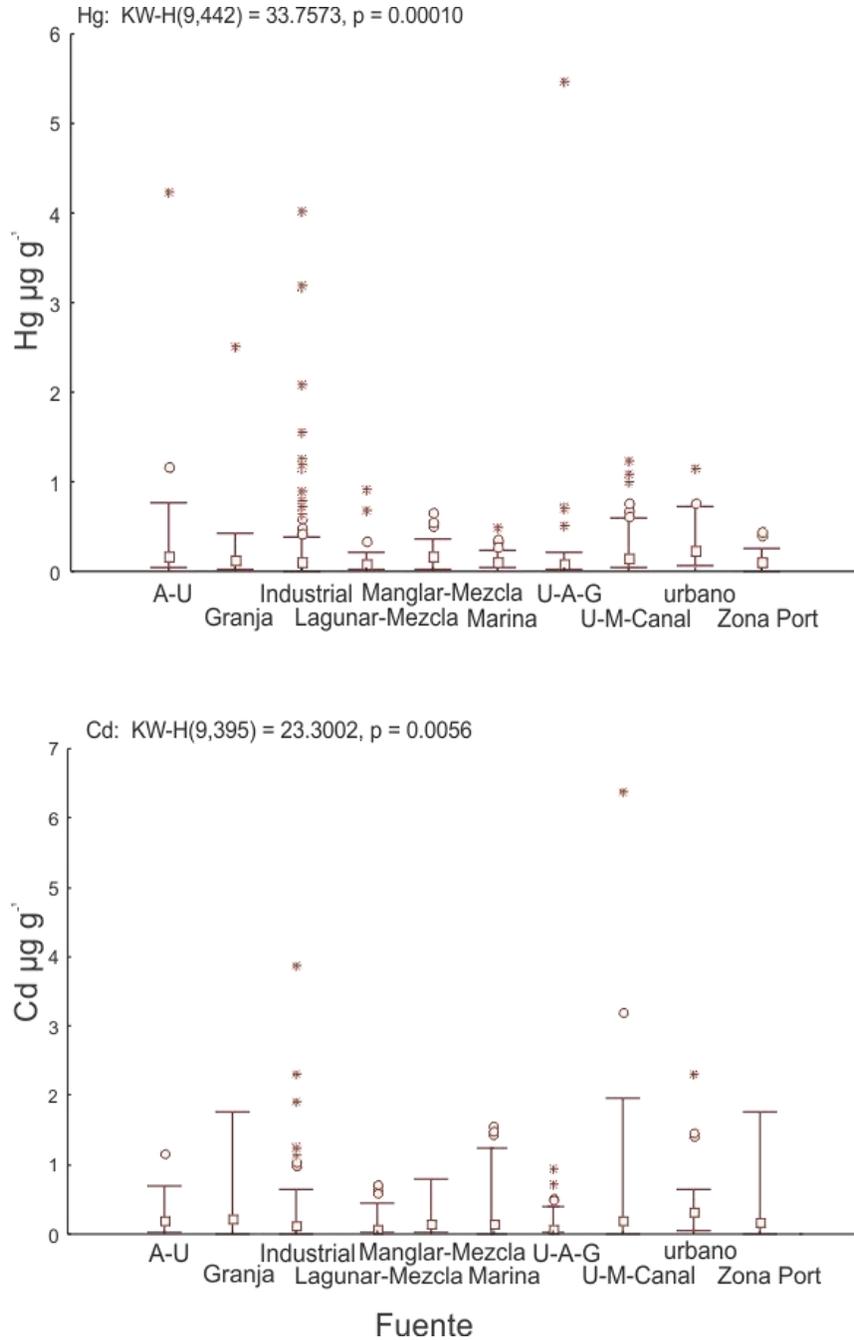


Figura 32. Fuentes y/o condiciones encontradas en los sitios de muestreo y concentraciones de Hg (a) y Cd (b) promediadas a lo largo del año en macroalgas recolectadas en cada zona. □ Mediana ⊏ Desviación estándar ○ Anómalos

* Extremos

8.8.2. Variabilidad temporal del Hg y Cd en macroalgas en función de las épocas climáticas

Se realizó una agrupación de las concentraciones en macroalgas en función de las tres épocas climáticas contrastantes. De acuerdo con las épocas, las concentraciones promedio de Hg fueron más altas en la temporada de secas cálidas, aunque la mayor frecuencia de concentraciones extremas fueron en la temporada de lluvias y secas frías. Se observaron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre la temporada de secas cálidas con secas frías y lluvias (Figura 33).

Para las concentraciones de Cd la época de secas frías nos da los valores extremos más altos, teniéndose diferencias significativas ($p < 0.05$) entre la temporada de secas cálidas con lluvias y secas frías (Figura 33).

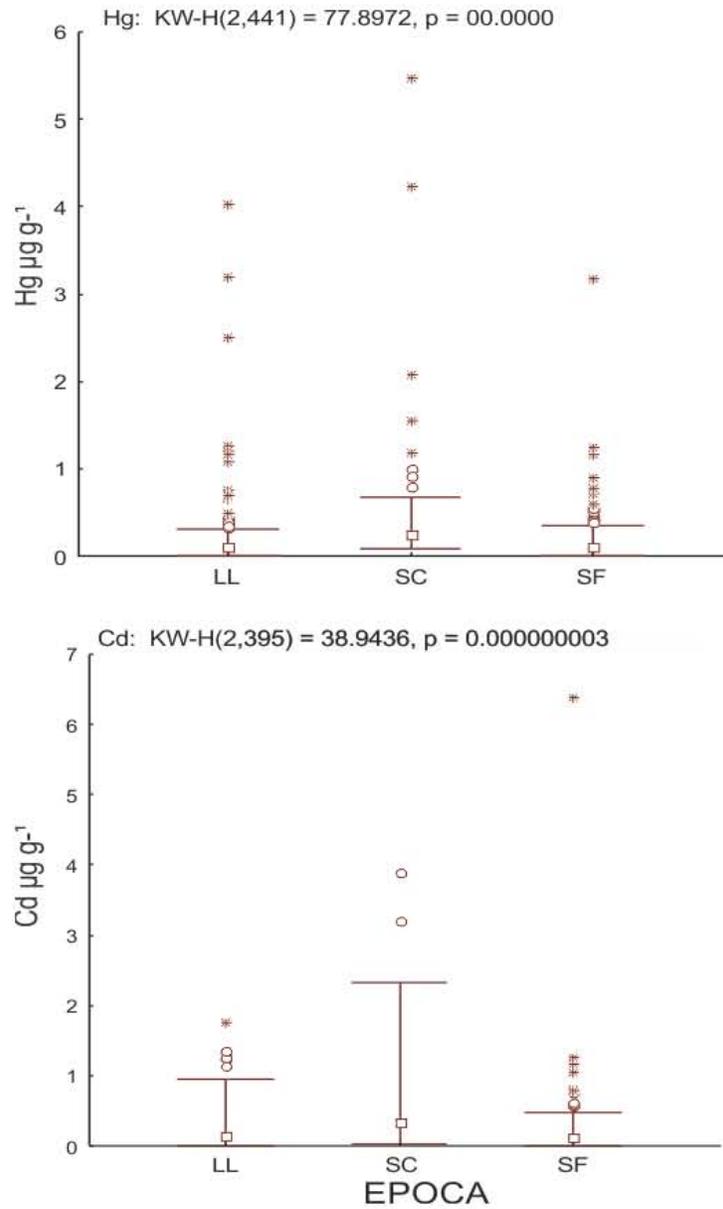


Figura 33. Concentraciones de Hg y Cd en macroalgas recolectadas en el Estero de Urias en tres épocas climáticas contrastantes. □ Mediana I Desviación estándar ○ Anómalos * Extremos.

8.8.3. Variabilidad del Hg y Cd en macroalgas en función de los ambientes dominantes

Las concentraciones de Hg y Cd se agruparon en función de tres ambientes encontrados dentro del Estero de Urias: ambiente lagunar (AL), zona de transición de lagunar a marino (LM) y un ambiente francamente marino (M). El ambiente lagunar-marino (LM) fue donde se obtuvieron las concentraciones de Hg extremas más altas. Este sitio se localizó en la mayor parte de la zona industrial y naviera del puerto de Mazatlán. Se observaron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre el ambiente lagunar (AL) con el ambiente marino (M) y LM.

Al igual que con el Hg, la concentración de Cd se presentó el promedio más elevado en el ambiente LM con diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los ambientes LM y AL (Figura 34).

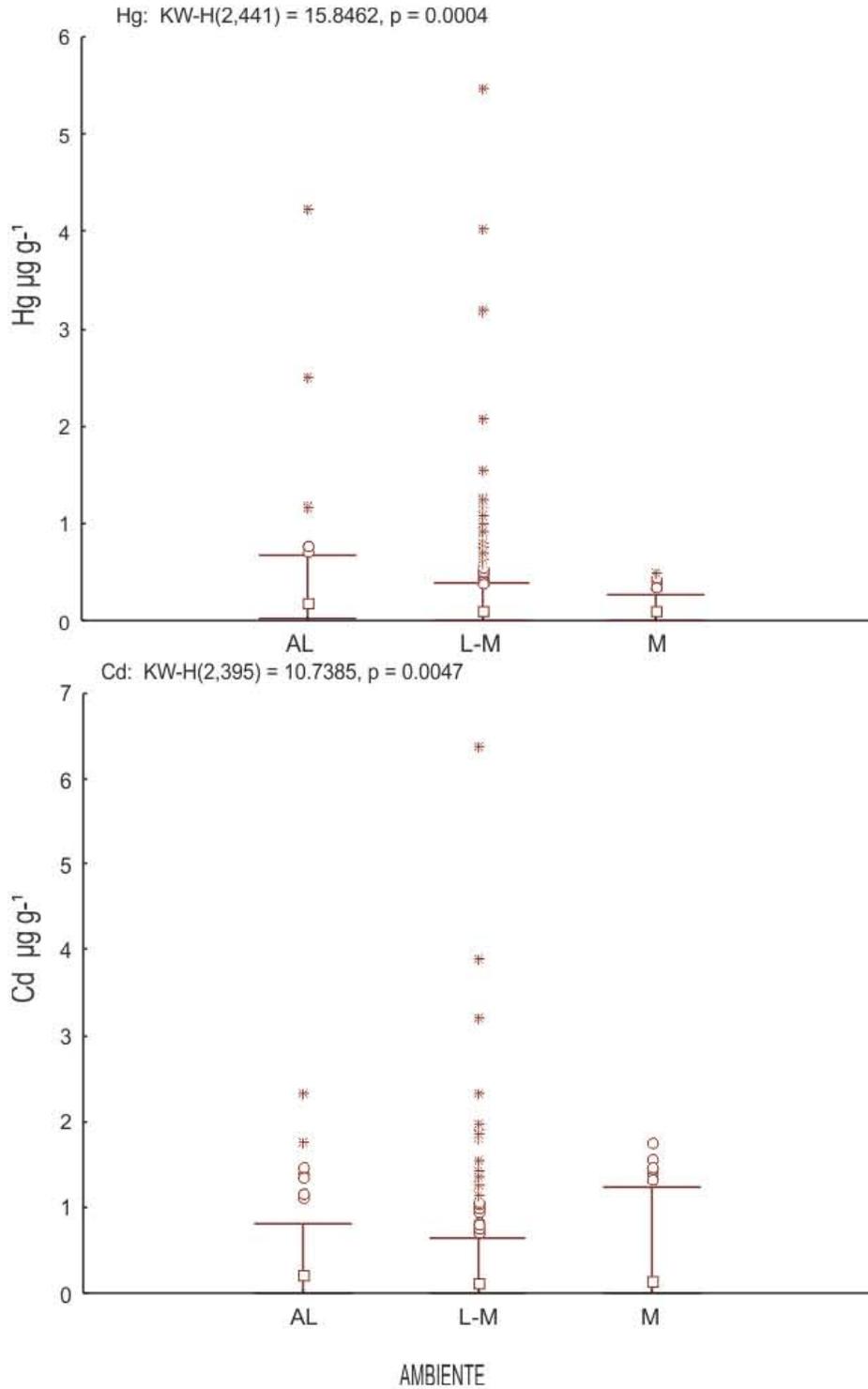


Figura 34. Concentraciones de Hg y Cd en macroalgas recolectadas en el Estero de Urias en tres ambientes representativos. □ Mediana I Desviación estándar ○ Anómalos * Extremos

8.8.4. Variación espacial de Hg y Cd en especies representativas del Estero de Urías

El promedio general de la concentración de Hg entre todas las estaciones dentro del Estero de Urias presentó su valor máximo ($0.39 \pm 0.76 \mu\text{g g}^{-1}$) en la UR4, comparables con los obtenidos para las estaciones UR1, UR9, UR13 y UR14. Los valores mínimos ($0.12 \pm 0.1 \mu\text{g g}^{-1}$) se observaron en las estaciones UR6, UR16 y UR18. Hubo una gran variabilidad entre las estaciones (Figura 35). Para las concentraciones de Cd, su valor máximo ($0.73 \pm 1.16 \mu\text{g g}^{-1}$) se encontró en la UR17 y su valor mínimo ($0.17 \pm 0.2 \mu\text{g g}^{-1}$) en la UR5. Aunque en menor proporción que el Hg, el Cd también presentó alta variabilidad entre las diferentes estaciones (Figura 35).

Las macroalgas más representativas dentro del Estero de Urias fueron las especies correspondientes a los géneros *Ulva* y *Gracilaria*, ya que se encontraron durante todos los meses del muestreo en diferentes estaciones de colecta. Para las concentraciones de Hg y Cd en las diferentes especies de *Ulva*, se observan variaciones entre estaciones (Figura 36). La estación UR9 seguido de la UR10, fue la que presentó los promedios más altos de Hg. Se observa una clara tendencia a disminuir la concentración de Cd desde la UR1 a la UR13, con un incremento excepcional en la UR11. Las estaciones UR14 a UR19 con influencia marina presentaron de nuevo un enriquecimiento en los valores de Cd.

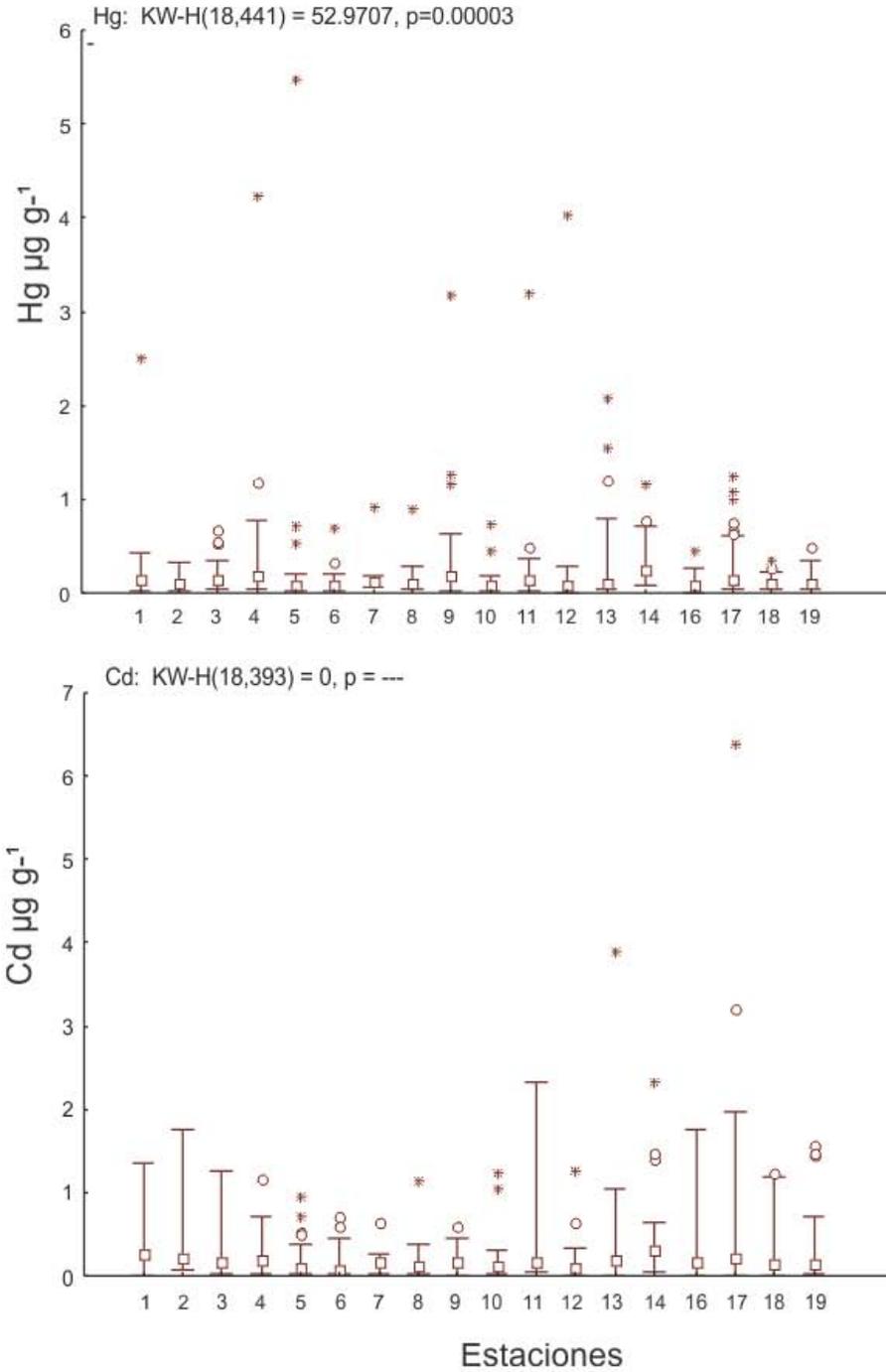


Figura 35. Concentraciones de Hg y Cd en macroalgas recolectadas en las diferentes estaciones localizadas en el Estero de Urias. □ Mediana ⊞ Desviación estándar ○ Anómalos * Extremos

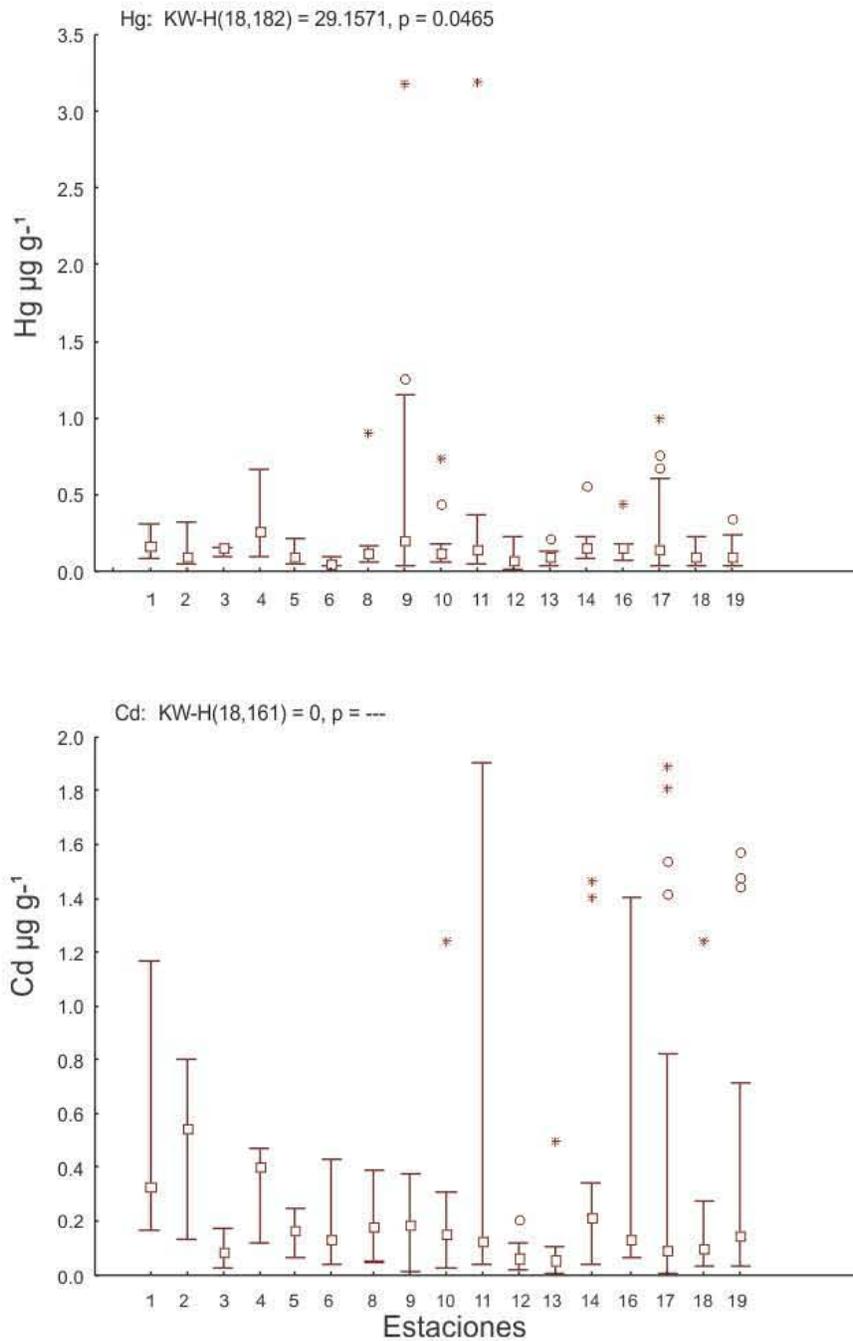


Figura 36. Concentraciones de Hg y Cd en especies del género *Ulva* recolectadas en las diferentes estaciones localizadas en el Estero de Urias. ◻ Mediana ◱ Desviación estándar ○ Anómalos * Extremos

Por otro lado se graficó la concentración promedio anual de Hg y Cd encontrada en los especímenes de *U. intestinalis* y *G. vermyculophylla* en función de la distancia, tomando de referencia a la UE1. Los resultados muestran que *U. intestinalis* (Figura 37) para la concentración de Hg se encuentran las más altas concentraciones entre los 8.5 y 13 km con respecto a la estación 1, que corresponden a las distancias comprendidas entre la UE8 y UE11 donde predomina la actividad industrial y cuenta con un ambiente lagunar-marino. Se obtuvo un promedio de $0.32 \pm 0.53 \mu\text{g de Hg g}^{-1}$. Para las concentraciones de Cd las concentraciones más elevadas las encontramos en las estaciones comprendidas entre el km 12.1 al 15.9, correspondiendo a las estaciones UE11-UE17, donde predominan actividades urbanas, portuarias e industriales, así como un ambiente marino, obteniéndose un promedio de $0.45 \pm 0.58 \mu\text{g g}^{-1}$.

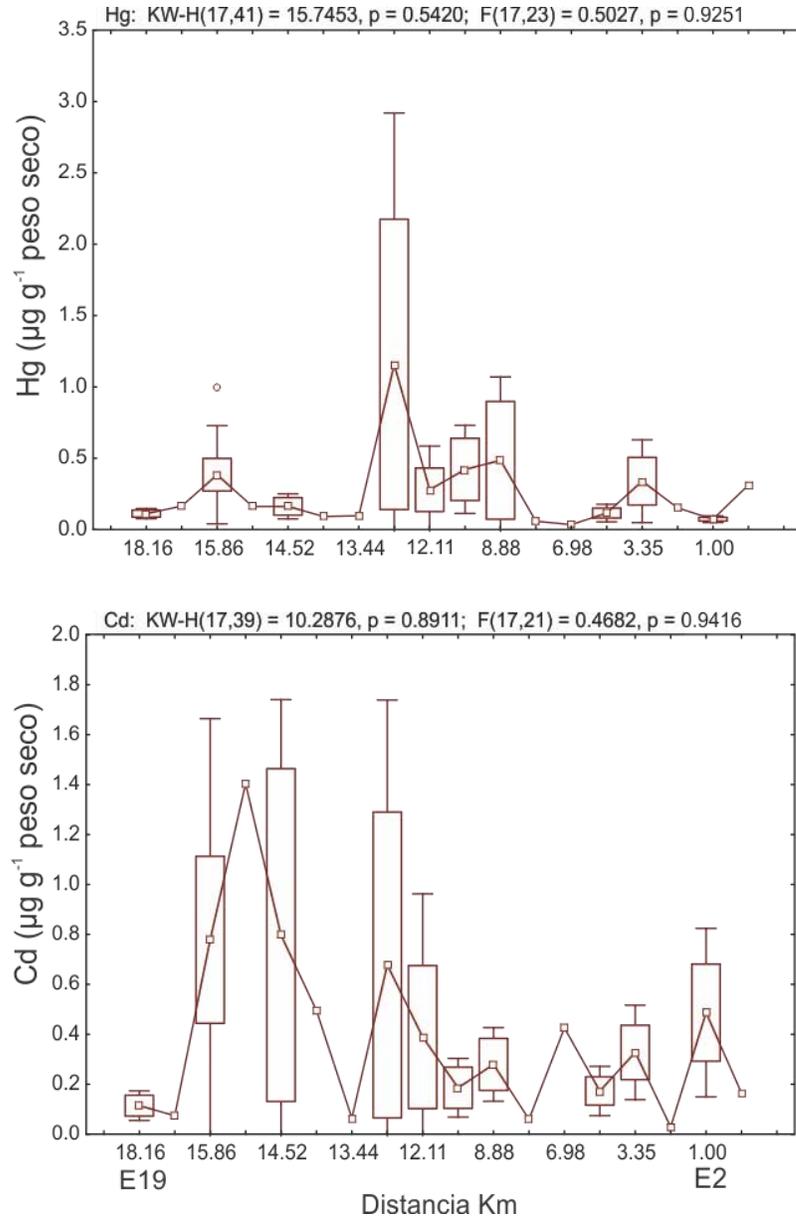


Figura 37. Concentración de Hg y Cd ($\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) anual de *Ulva intestinalis* en

función de su distancia. ◻ Promedio □ Promedio \pm error estandar I Promedio \pm DE

○ Anómalos * Extremos

Para los especímenes de *G. vermiculophylla* recolectados en el Estero de Urías durante todo el muestreo, se obtuvieron concentraciones >1.00 ($\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) para los valores de Hg, con un promedio de 0.21 ± 0.64 $\mu\text{g g}^{-1}$, en la Figura 38, se expresan las concentraciones <1.0 $\mu\text{g g}^{-1}$, predominando los valores más elevados en la distancia 15.86, presentando una tendencia similar en las estaciones que abarcan desde los 2.75 a 10.91 Km, correspondiendo a las estaciones 2-9, predominando las actividades industrial, urbana, manglar y granja, con ambiente lagunar-marino principalmente. Para el Cd, las concentraciones más elevadas predominan en las distancias superiores a los 12.1 Km, correspondientes a las estaciones 12 en adelante, donde predomina la actividad portuaria, urbana e industrial, con ambiente principalmente marino. Se obtuvo un promedio de 0.13 ± 0.21 $\mu\text{g g}^{-1}$, encontrándose concentraciones > 1.00 , solo en la UE4 (3.35 km).

Para las concentraciones promedio de Hg, en los especímenes de *U. intestinalis* estas fueron más elevadas que *G. vermiculophylla*; sin embargo, esta última presentó un valor máximo extremo. No se encontró similitud en el patrón de concentraciones entre ambas especies. En cuanto a los valores de Cd, *U. intestinalis* presentó concentraciones más elevadas que *G. vermiculophylla*, aunque similitud en la tendencia.

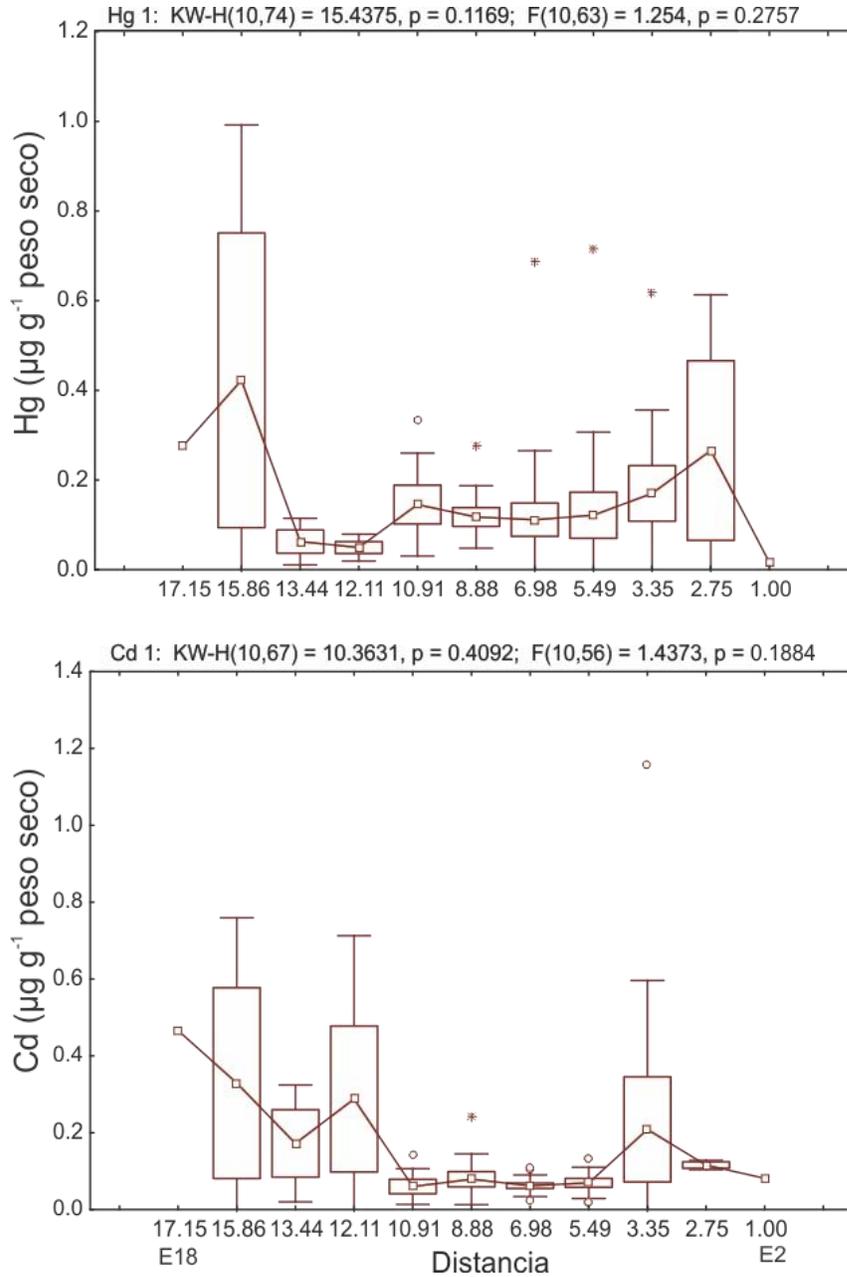


Figura 38. Concentración de Hg y Cd ($\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) anual de *Gracilaria vermiculophylla* en función de su distancia. . □ Promedio □ Promedio \pm error estándar

I Promedio \pm DE ○ Anómalos * Extremos

8.8.5. Variación temporal de Hg y Cd en especies representativas del Estero de Urias

En general, la época de lluvias es la que presenta mayor variabilidad entre sus rangos extremos y anómalos, presentándose para las concentraciones de Hg un mayor número de extremos en el ambiente LM, sin presentarse diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los diferentes ambientes. Las concentraciones de Cd presentan pocos valores extremos, y la mayoría se presentan en el ambiente LM. No se observó diferencias significativas ($p < 0.05$) entre ambientes (Figura 39).

Para la época de secas cálidas, tampoco se observaron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los ambientes, tanto para las concentraciones de Hg como para las de Cd, siendo el ambiente lagunar marino el que presenta la mayor cantidad de valores tanto de extremos como anómalos de los dos metales (Figura 40).

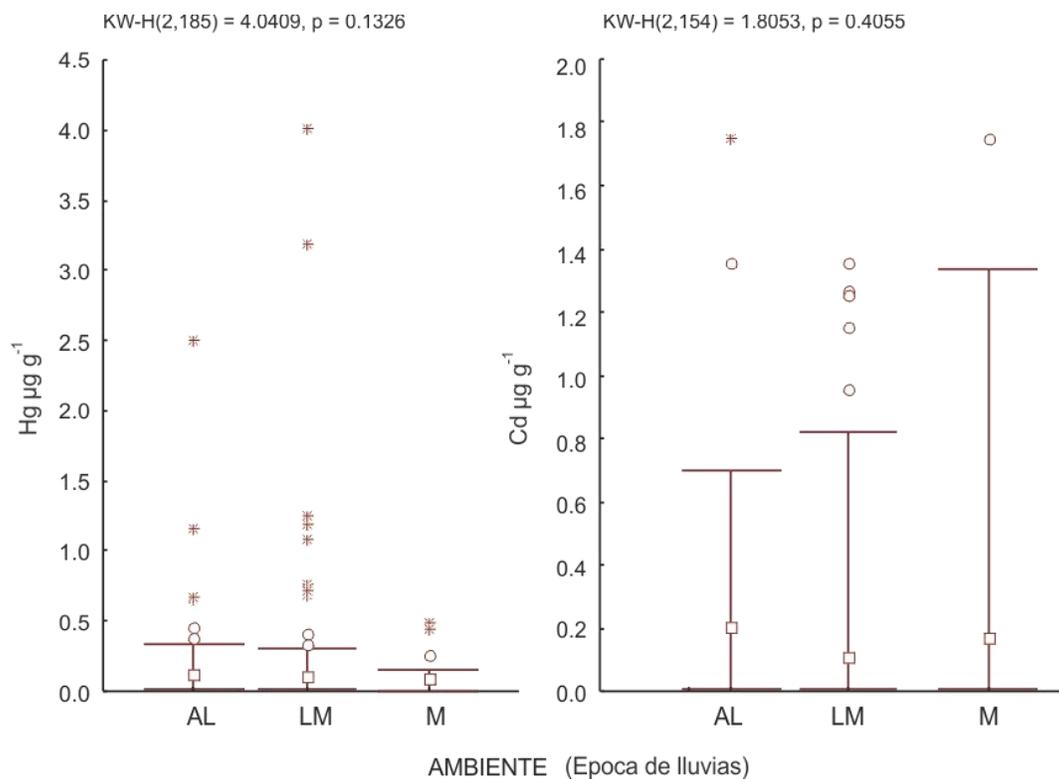


Figura 39. Concentración de Hg y Cd ($\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco), durante la época de lluvias, para los diferentes ambientes de las macroalgas del Estero de Urias. \square Mediana \perp Desviación estándar \circ Anómalos $*$ Extremos

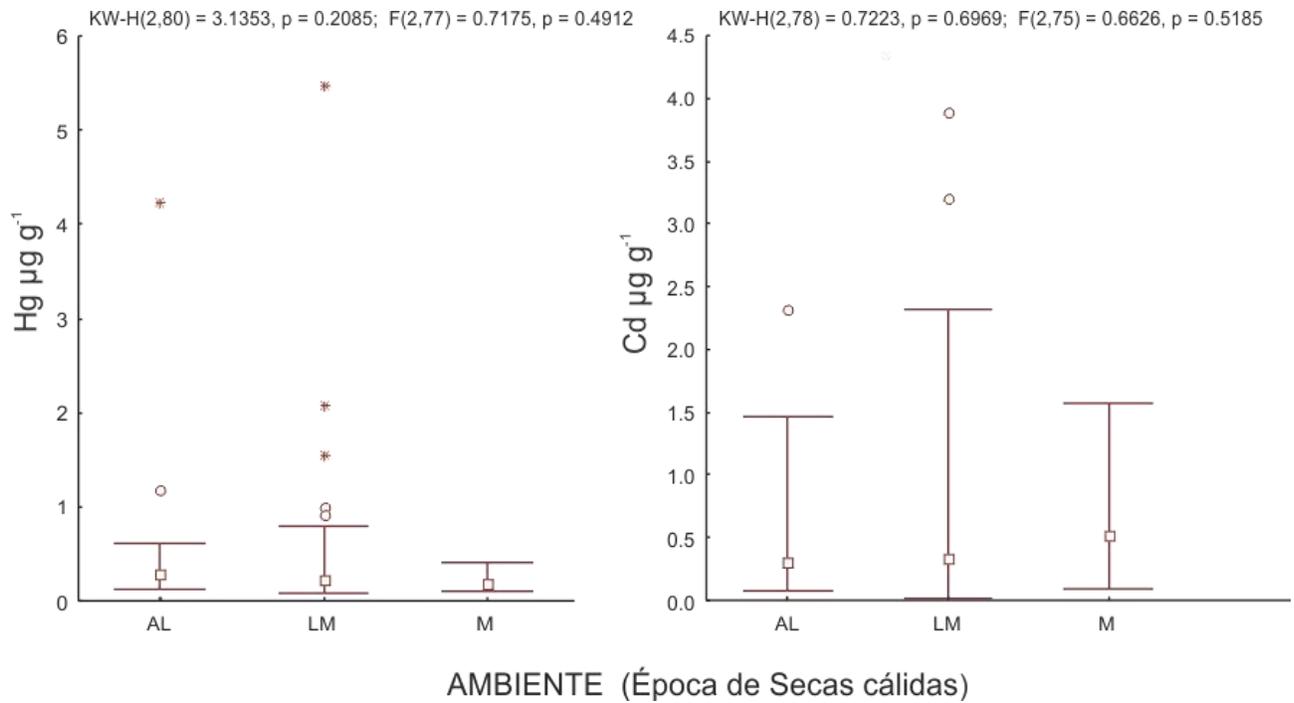


Figura 40. Concentración de Hg y Cd ($\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco), durante la época de secas cálidas, para los diferentes ambientes de las macroalgas del Estero de Urias. \square Mediana \perp Desviación estándar \circ Anómalos * Extremos

En la época de secas frías, el ambiente LM presentó la mayor cantidad de valores extremos y anómalos para las concentraciones de Hg y Cd, y se presentaron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre el AL con el M y LM para ambos metales (figura 41).

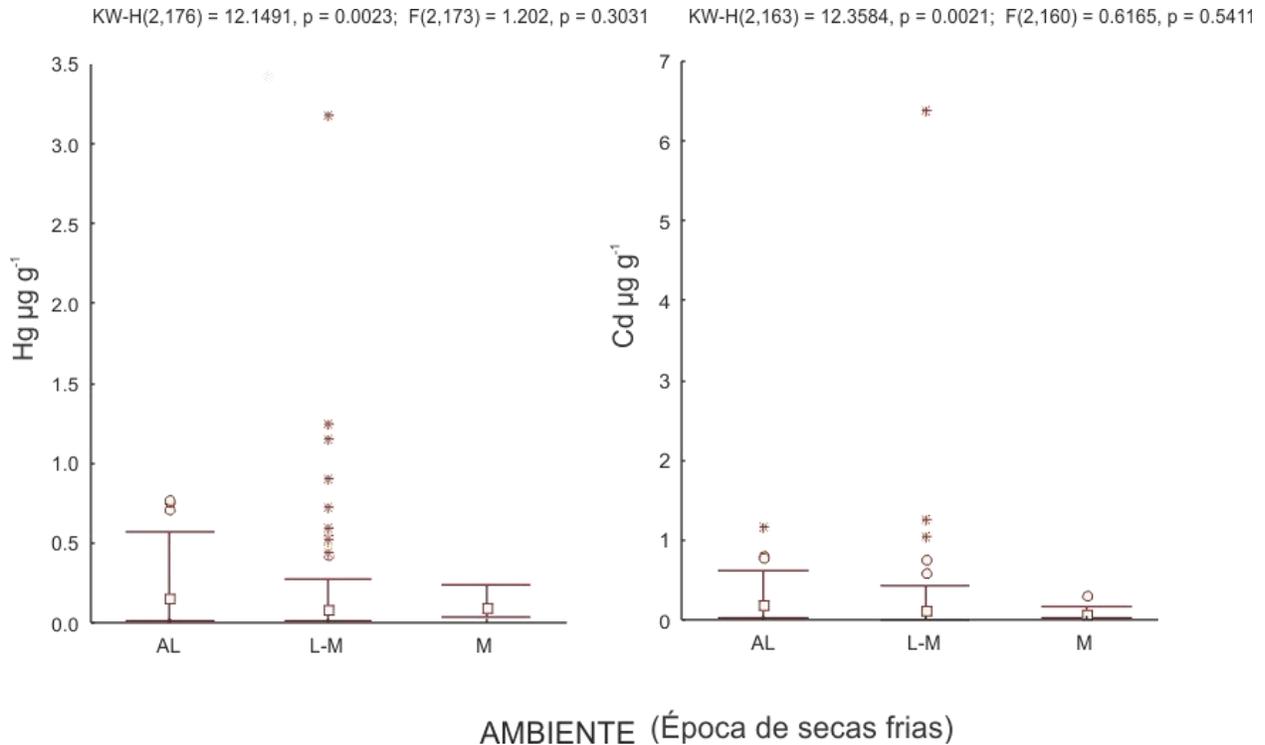


Figura 41. Concentración de Hg y Cd ($\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco), durante la época de secas frías, para los diferentes ambientes de las macroalgas del Estero de Urias. AL=Ambiente marino, L-M=Lagunar marino, M=Marino. □ Mediana I Desviación estándar ○ Anómalos * Extremos

Debido a la disponibilidad de muestras de macroalgas del género *Ulva* recolectadas en Febrero del 2009 y Febrero de 2010 se realizó un comparativo. De este género encontramos las siguientes especies: febrero-09, *U. expansa*, *U. clathrata*, *U. intestinalis*, en febrero-10 se encontraron las mismas además de *U. lobata*, *U. lactuca* y *U. flexuosa*. Los resultados muestran diferencias significativas ($p < 0.05$) entre ambos años tanto para el Hg, como para el Cd (Figura 42). Para ambos metales las menores concentraciones se encontraron en especímenes colectados en 2010.

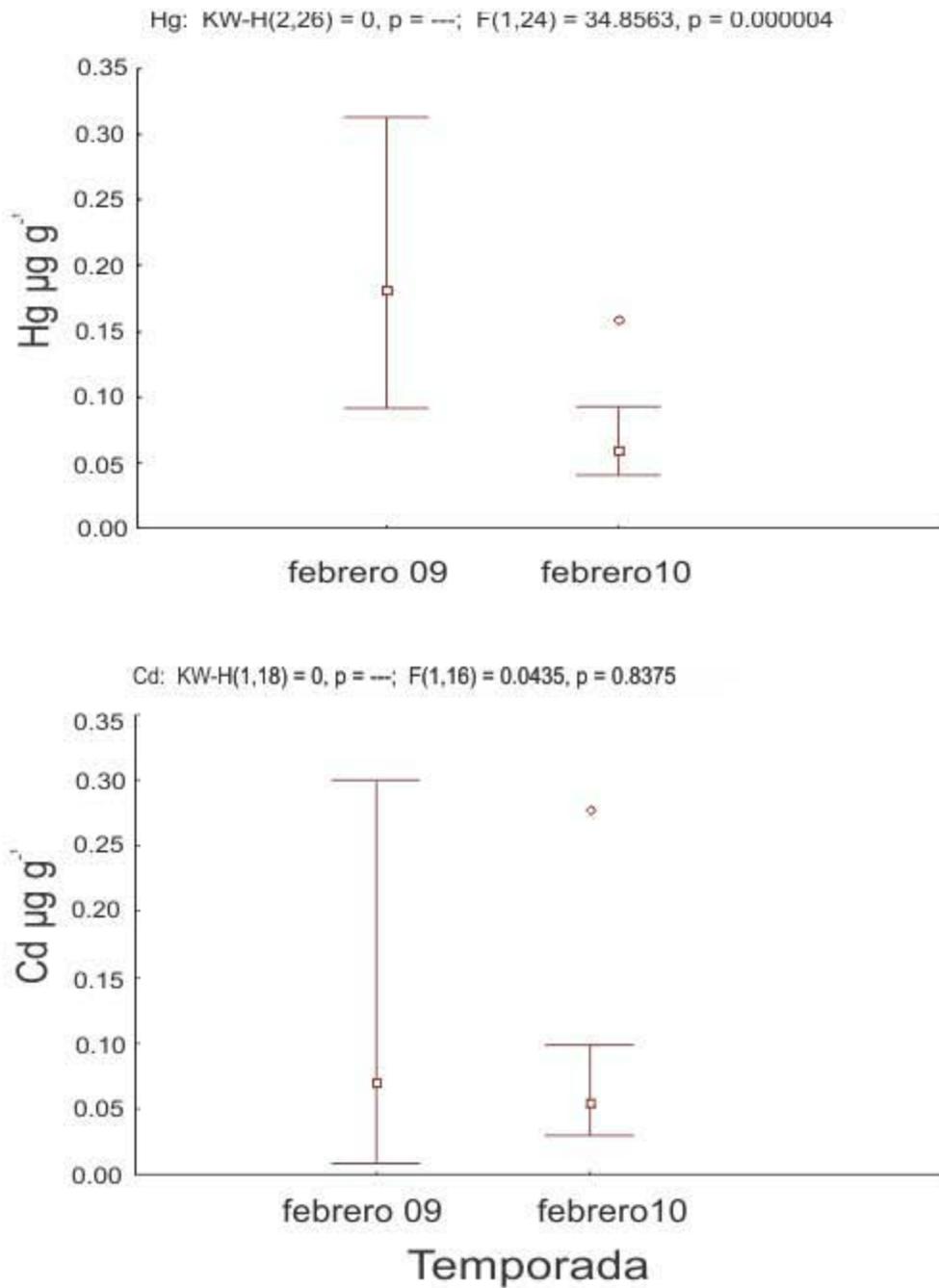


Figura 42. Comparativo de las concentraciones de Hg (a) y Cd (b) en macroalgas del género *Ulva* recolectadas en el Estero de Urias en Febrero del 2009 y Febrero del 2010. ◻ Mediana ▮ Desviación estándar ○ Anómalos * Extremos

En el comparativo anual de las macroalgas del género *Ulva* se observa que la variación anual del Hg es muy amplia, teniéndose diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los meses abril y mayo del 2009 con los junio a noviembre del 2009 y los de enero a marzo del 2010 (Figura 43).

Las concentraciones de Cd también muestran una elevada variabilidad, con diferencias significativas ($p < 0.05$) para los meses de secas frías (febrero a abril del 2009 y enero a marzo 2010) y cálidas (agosto a noviembre del 2009) (Figura 43).

Además de los comparativos generales (ej. todos los especímenes del género *Ulva* por tipo de ambiente), se realizó un estudio de la variación mensual de las concentraciones de Hg y Cd en las especies más representativas del sistema. Para tal propositivo se seleccionaron a las especies de *U. intestinalis* y *G. vermiculophylla*, que son las que mejor representan al sistema en ambas dimensiones espacio-temporal. Los resultados presentados en la Figura 44 muestran que para la especie *U. intestinalis*, la concentración de Hg fueron mayores en los meses de Abril-Octubre del 2009, con concentraciones bajas y constantes el resto del año. Para el Cd, se encontraron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre sus valores, principalmente en los meses de mayo y junio del 2009, donde se obtuvieron los valores más altos.

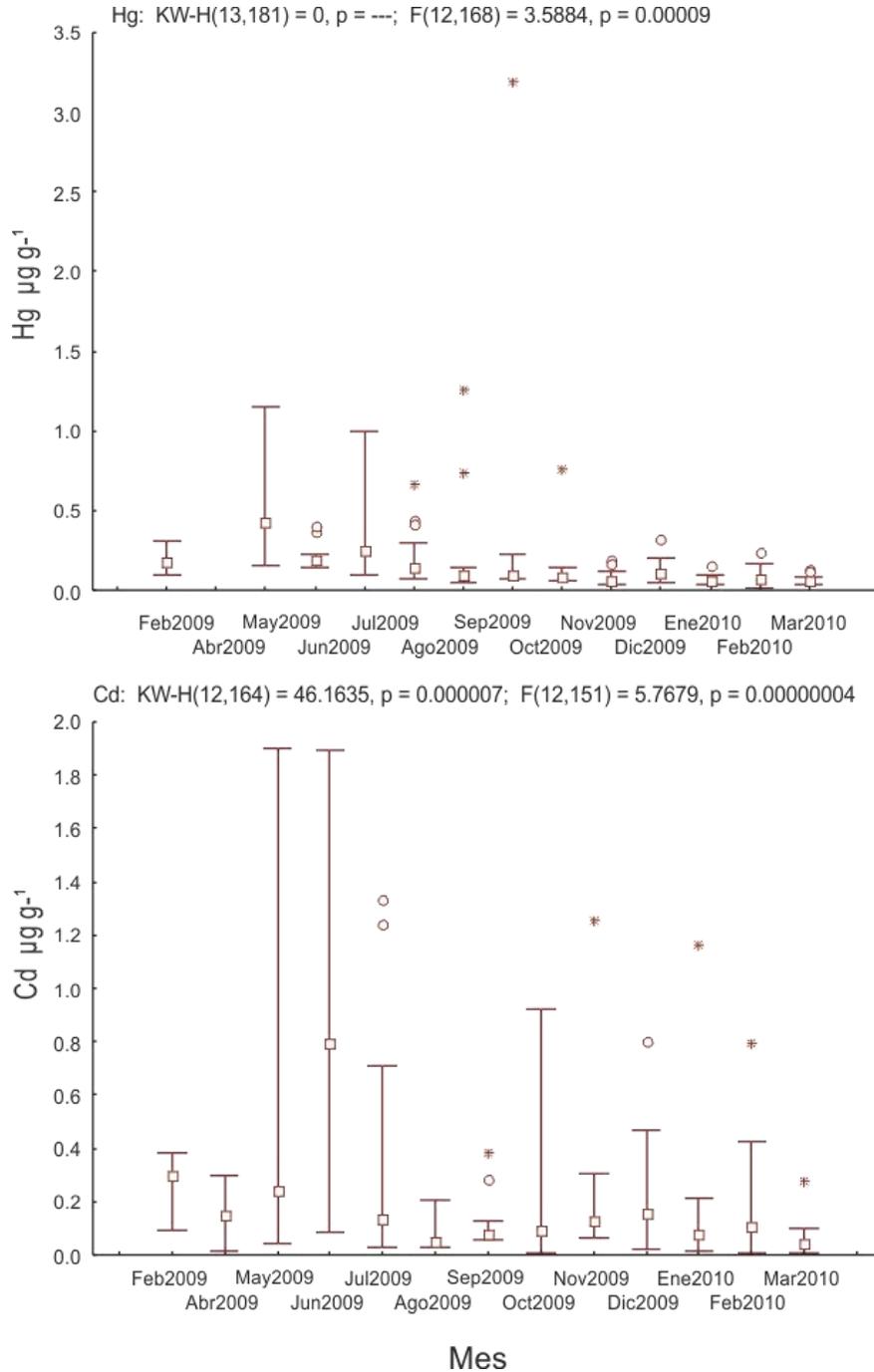


Figura 43. Comparativo de las concentraciones de Hg (a) y Cd (b) en macroalgas del género *Ulva* recolectadas en el Estero de Urias durante el periodo de muestreo. □

Mediana | Desviación estándar ○ Anómalos * Extremos

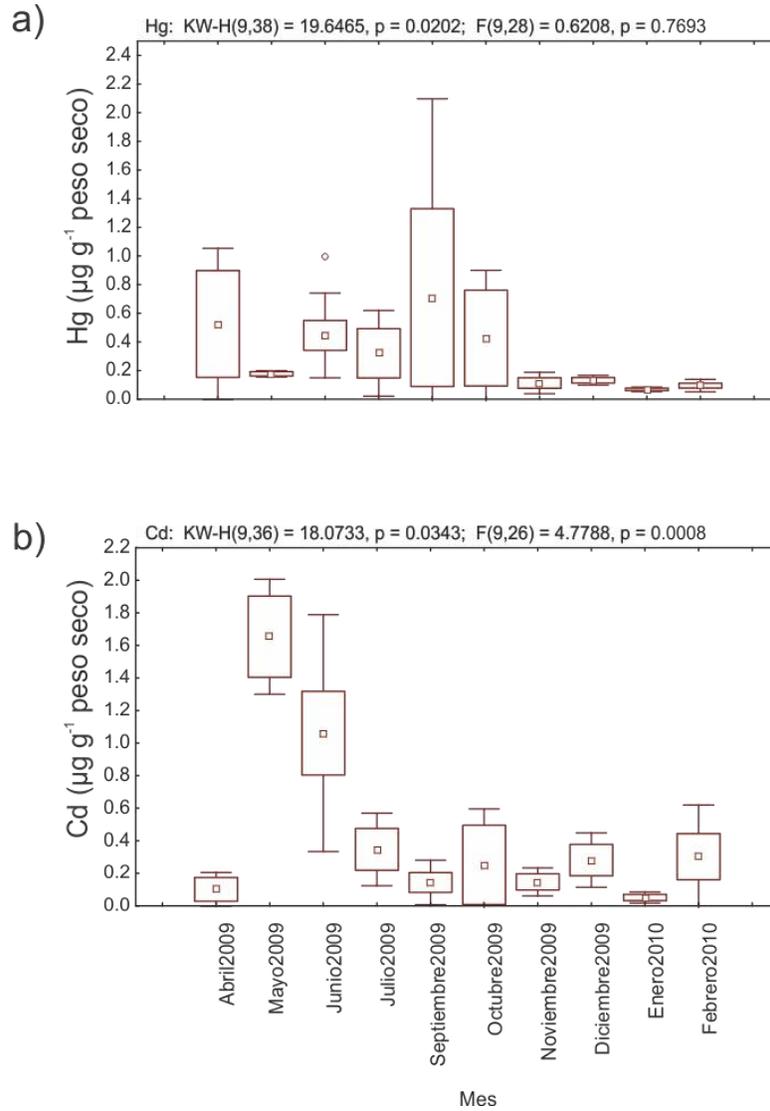


Figura 44. Comparativo de las concentraciones de (a) Hg y (b) Cd ($\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) de la especie *U. intestinalis* recolectadas en el Estero de Urias durante todo el periodo de muestreo. . \square Promedio \square Promedio \pm error estandar \perp Promedio \pm DE

○ Anómalos * Extremos

Para la especie *G. vermiculophylla* (Figura 45), se observaron concentraciones más altas de Hg en los meses de Febrero-Septiembre del 2009 y en los meses restantes no se observó variabilidad entre sus valores ($p>0.05$). Para el Cd, no se observaron diferencias significativas ($p>0.05$), presentándose los valores más altos en los meses Febrero, Junio y Julio del 2009 en tanto que los meses restantes tuvieron poca variación entre las concentraciones obtenidas.

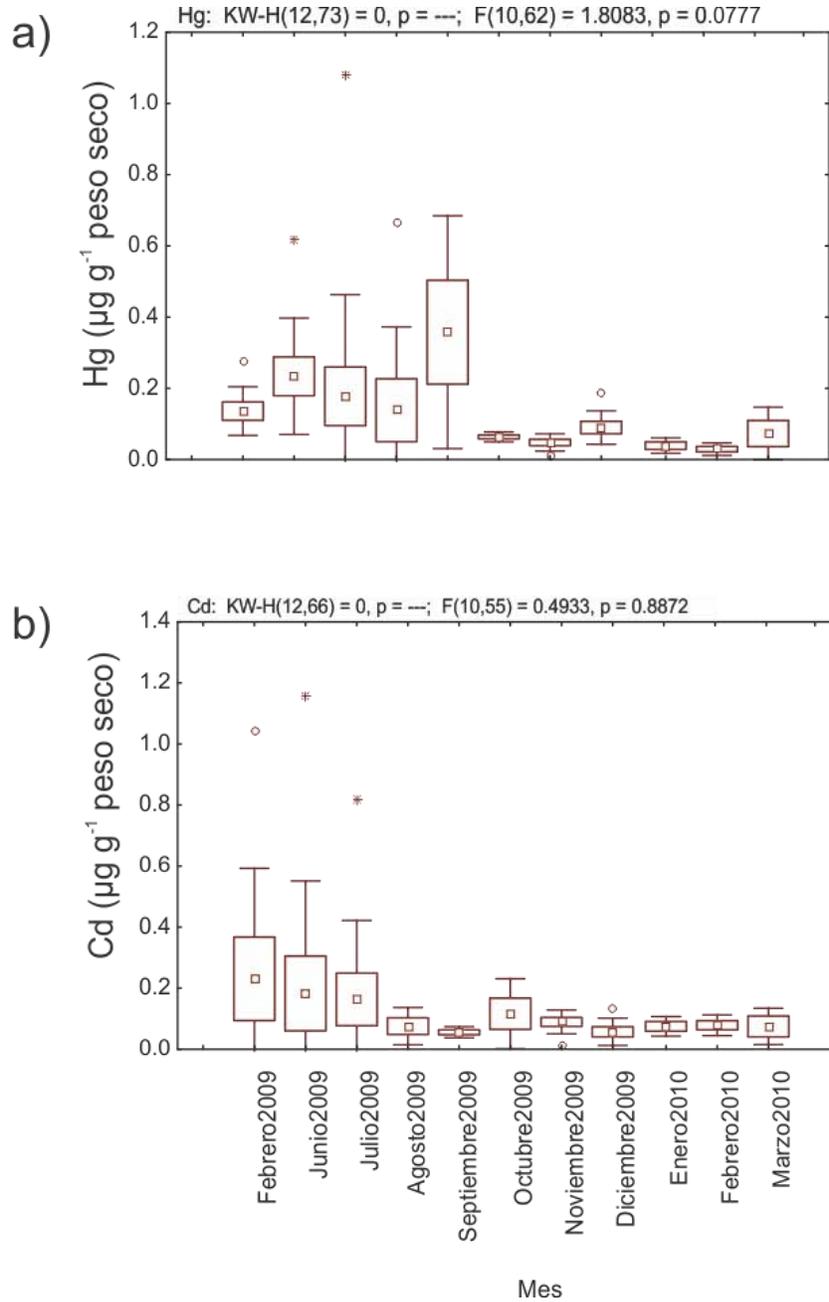


Figura 45. Comparativo de las concentraciones de (a) Hg y (b) Cd ($\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) de la especie *G. vermiculophylla* recolectadas en el Estero de Urias durante todo el período de muestreo. \square Promedio \square Promedio \pm error estandar \perp Promedio \pm DE
 \circ Anómalos * Extremos.

9. DISCUSIÓN

9.1 Mercurio en el Golfo de California

El caso del Hg permitió observar que una gran cantidad de especímenes analizados en este estudio presentaron concentraciones por <LD. Este resultado coincide con los trabajos realizados por De la Lanza (1989), Lares (2002), Astorga-España (2007) que registraron concentraciones no detectables e inferiores a unos cuantos ng g^{-1} . Contrariamente, también se encontraron valores de concentración considerados elevados ($2.62 - 6.61 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) en comparación con la literatura consultada (Anexo 1). Los valores más elevados se encontraron en la Bahía de La Paz, principalmente en algas de la División Rhodophyta en especímenes de los géneros *Gracilaria*, *Spyridia* e *Hypnea* que fueron los más representativos. En esta área se tiene una fuente puntual de contaminación por Hg atmosférico, la termoeléctrica Punta Prieta II en operación desde hace más de tres décadas. El Hg emitido se deposita, en parte, en las aguas de la Bahía y en su cuenca de captación. La quema de combustóleo para la generación del calor es la principal causa del aporte antropogénico de Hg en la zona. Es importante resaltar que además del aporte por vía atmosférica, en las costas de BCS recientemente fueron descubiertas ventilas hidrotermales someras que podrían estar influyendo en los enriquecimientos de elementos químicos (Greene y Forrest, 2002; Canet et al., 2004; Prol-Ledesma et al., 2004; Forrest et al., 2005). Las fuentes son discutidas a detalle posteriormente en la sección 9.6.

Otros sitios dentro del Golfo de California con fuentes puntuales de aporte de Hg por termoeléctricas fueron el Puerto de Mazatlán con rangos desde 0.01 a 2.11 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco, Puerto de Guaymas con concentraciones que van desde 0.01 – 0.55 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco, y Puerto Libertad con rangos de 0.01 – 0.21 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco. Con excepción de los máximos obtenidos para La Paz, BCS, los valores de este estudio son comparables con los reportados en las Costas de Ghana (0.01-0.22 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco; Serfor-Armah et al., 2000) y en Izmir en Turquía (promedio de $0.336 \pm 0.13 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco; Akcali y Kucuksezgin, 2011).

9.2 Cadmio en el Golfo de California

Respecto al Cd, la máxima concentración (15.83 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) se obtuvo en Playa Guadalupe en Sonora, sin encontrar concentraciones similares en la literatura consultada para Golfo de California. Lorey (2002) registró resultados similares en San Quintin, B.C. (3.9-11.3 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) al igual que Rajendran (1993) en las costas de Malasia (9.25-16.32 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) y Mohammad et al., (1985) en las costas de Aqaba, Jordania (2.4-8.2 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco).

Consideramos que las elevadas concentraciones de Cd en algunas zonas del Golfo del lado de la península pueden ser explicadas como resultado del enriquecimiento del agua de mar costera debido a las surgencias de agua presentes en el Golfo de California (Delgadillo-Hinojosa et al., 2001, Segovia-Zavala et al., 1997). Pero en las macroalgas colectadas en el centro-sur de Sonora y en el centro-norte de Sinaloa también puede deberse al uso intensivo y extensivo de fertilizantes fosfatados,

los cuales contienen altas cantidades de Cd (Forster y Wittmann, 1979; Soto-Jiménez et al., 2003).

Los rangos comprendidos en el Estero de Urías ($0.01-0.91 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) se encuentran ligeramente por encima a los encontrados por Jara Marini (2008) ($0.1-0.42 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) hace unos años. El rango de concentración de Cd obtenido en el Puerto de Guaymas ($0.07-2.17 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) y en Yávaros ($0.72-3.02 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) también se encuentra ligeramente por encima a los encontrado por Páez-Osuna et al., (2000) ($1.4-1.9 \mu\text{g g}^{-1}$ y $0.7-0.9 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco, respectivamente).

9.3 Arsénico en el Golfo de California

Las concentraciones de As obtenidas en los especímenes recolectados en el Golfo de California ($0.17-80.04 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) son similares a los obtenidos previamente por Sánchez Rodríguez (2000) en especímenes colectados en la Bahía de Loreto, BCS (1.48 hasta $41.4 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) y a los reportados por Rodríguez Castañeda (2006) ($3-77 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) de La Paz, BCS. En otras áreas geográficas se han reportado concentraciones por encima de los obtenidos en este estudio, como son los encontrados en Potter Cove ($6-152 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) (Farías et al., 2007), en la Laguna de Venecia ($7-242 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) (Caliceti, 2001) y en Sídney, Australia ($5-173 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) (Tukai et al., 2002). En algunos casos, los niveles elevados de As pueden ser atribuidos a la presencia de minerales fosfatados (Shumilin et al., 2001).

9.4 Lagunas costeras de Sinaloa

Dado que se compararon dos estaciones climáticas diferentes, se encontró que las concentraciones de Hg obtenidas en la temporada de lluvias ($0.08 \pm 0.04 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) eran similares durante la temporada de secas ($0.01 \pm 0.11 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco). Green-Ruiz (2005) señala que la concentración de Hg en el sedimento no es un factor importante para las macroalgas, ya que captura el Hg de la fracción disuelta. Por lo que la concentración de este metal en las macroalgas solo podría verse afectada por el aporte puntual. Aunque la mayor parte del Hg que se deposita permanece en el sedimento, una fracción puede ser bio-metilada por actividad bacteriana y reincorporada a la columna de agua y potencialmente transferida a través de la trama trófica (Jara-Marini et al., 2011).

Solo dos estudios han registrado niveles de Hg en macroalgas del Golfo de California y las lagunas costeras (Green-Ruiz, 2005; Jara-Marini, 2008). Comparativamente, el rango de concentraciones de Hg encontrado para *Caulerpa sertularioides* en el Estero de Urías ($0.11 - 0.13 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) es significativamente mayor al reportado por Jara-Marini (2008) ($0.021-0.029 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco). Para la especie *Gracilaria vermiculophylla* el rango de concentraciones en este estudio ($0.032 - 0.041 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) fue similar al reportado por los mismos autores ($0.04-0.09 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco). Las diferentes especies del género *Ulva* encontradas en este estudio tienen concentraciones más altas que las reportadas por Jara-Marini (2008), en las diferentes lagunas ($0.032 - 0.041 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco). Para las concentraciones de Cd se encontró que la época de secas ($1.66 \pm 1.58 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) presentó concentraciones más elevadas que la temporada de lluvias

($1.0 \pm 1.63 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco), coincidiendo con los resultados presentados por Pérez-Escobedo (2011) y Hernández-Tovalín (2009) quienes encontraron las concentraciones más altas en la época de secas, lo que atribuyeron a que la macroalga no se encontraba en su período de crecimiento. Se tiene registradas bajas concentraciones de metales pesados en macroalgas para los meses cálidos, debido a las altas tasas de crecimiento que se presentan en ese período, lo que diluye los metales acumulados en su tejido (Rainbow y Philips, 1993; Malea y Haridonitis, 1999). Sin embargo, es necesario destacar la gran variabilidad de resultados entre especies, estaciones y meses del año.

9.5 Estero de Urias

Dentro del Estero de Urias se encuentra una termoeléctrica, que consideramos una fuente puntual de Hg. La principal forma de transporte de Hg es por vía atmosférica, por lo que las concentraciones de Hg más altas las encontramos distribuidas a lo largo de todo el Estero de Urias, predominando dichos valores en las estaciones UR4, UR5 y UR12. Los cambios en la dirección e intensidad del viento influyen en las distancias y tasas de depósito de Hg en las aguas costeras y en sus cuencas de captación. En este estudio, se observó que la predominancia del viento fue hacia el noreste (abril-agosto'09; $2.2 - 6.04 \text{ km h}^{-1}$) y sureste (sep'09-feb'10; $3.35 - 7.5 \text{ km h}^{-1}$) de la termoeléctrica considerada como la fuente puntual. La predominancia del viento hacia tales direcciones sugiere que el depósito del Hg y otros metales está ocurriendo hacia una zona suburbana de Mazatlán rodeada de campos agrícolas y

grandes extensiones de terreno con vegetación natural. Sin embargo, es necesario considerar que ocurren cambios frecuentes en la velocidad y dirección del viento, inclusive durante el día. Es posible observar como la estela de la nube de humo que arrojan las chimeneas de la termoeléctrica recorren grandes distancias, y frecuentemente, esta estela cruza toda la ciudad de Mazatlán hacia la bahía, principalmente en el invierno y primavera. Esto amplía las áreas de depósito del Estero de Urias y su cuenca de captación y abarca grandes extensiones de la Bahía de Mazatlán, en donde también se encontraron altas concentraciones de Hg en especímenes de distintas especies de macroalgas.

Como se mencionó, se ha realizado solo un estudio en el Estero de Urias, en el cual se cuantificó el contenido de Hg en macroalgas (Jara-Marini, 2008), con valores más bajos a los encontrados en este estudio en las especies coincidentes que incluyen *G. vermiculophylla*, *C. sertularioides* y *U. lactuca* (rango 0.026-0.029 $\mu\text{g g}^{-1}$ vs 0.09-0.13 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco). Esto sugiere una aparente tendencia a incrementarse el contenido de Hg, con respecto al tiempo. En nuestro estudio, las concentraciones más altas de Hg se encontraron en las temporadas de secas cálidas, seguidas de las de lluvias y secas frías, aunque no se presentaron diferencias significativas ($p > 0.05$) en sus concentraciones promedios durante todo el período de muestreo. Especímenes del género *Ulva*, en particular *U. lactuca* y *U. intestinalis*, se constituyen en los mejores biomonitores en esta laguna debido a que se encontraron durante todo el muestreo en todas las estaciones con concentraciones de Hg desde <L.D. hasta $>1.00 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco (UR11, UR17 y UR9 en las épocas de secas frías y lluvias).

De los pocos estudios de Cd que se han realizado dentro del Estero de Urias se han encontrado similitudes en los estudios realizados por Pérez-Escobedo (2011) y Jara-Marini (2008), en especies como *Bostrychia* sp., *C. sertularioides* y *U. lactuca*. Asimismo se encontraron diferencias en la especie *G. vermiculophylla* siendo menor en este estudio ($0.05-0.08 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) que las de los otros autores ($0.1-0.4 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco). También especies del género *Ulva* fueron las mejores representadas dentro del Estero de Urias con un rango de concentraciones de Cd desde L.D. a $>2.00 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco (UR17 y UR13-14). Las estaciones en ambientes lagunar-marino, con la influencia de aguas de mar abierto que pudieran estar enriquecidas en forma natural con Cd (Delgadillo-Hinojosa et al., 2001). Las concentraciones más altas se dieron en la época de secas cálidas coincidiendo con Pérez-Escobedo (2011). Cabe destacar que Jara-Marini (2008) no encontró diferencias significativas entre las diferentes épocas.

9.6. Metales en macroalgas del Golfo y su relación con las fuentes identificadas

La longitud de línea de costa del Golfo de California (1,100 km) presenta cambios en la diversidad y abundancia de las especies de macroalgas, contrastes climáticos latitudinales y longitudinales, diferencias regionales en el desarrollo e intensidad de las actividades antropogénicas, condiciones fisicoquímicas cambiantes, entre otras. Todos estos cambios y contrastes, aunado a la variabilidad inherente en las especies de las macroalgas y estadios de crecimiento, son la causa de la gran variabilidad en la concentración de metales en las macroalgas estudiadas. Aunque no es el propósito de

este trabajo el determinar el peso relativo que cada uno de los factores mencionados, en esta sección se pretende discutir la importancia que cada factor tiene sobre los niveles de metales encontrados en las macroalgas. En particular se discutirá la influencia que los diferentes factores bióticos y abióticos tienen sobre el cumplimiento o no de las hipótesis planteadas.

9.6.1. Fuentes de metales en el Golfo de California

En esta sección se hace énfasis en las fuentes de metales en la región como factor determinante en la concentración de las macroalgas. Se discuten las fuentes naturales (e.g. surgencias y ventilas hidrotermales) y antropogénicas (agricultura, ganadería, industrial, urbanismo y minería) a la luz de los niveles de Hg, Cd y As encontrados en las macroalgas.

9.6.1.1. Surgencias y actividad hidrotermal

La variabilidad temporal del Hg en biomonitores no ha sido muy estudiada, especialmente en relación al régimen de surgencias (Lares et al., 2002). La principal fuente para el Hg en el ambiente marino es por transporte atmosférico y su subsecuente deposición (Gill y Fitzgerald, 1988). Una fracción significativa del Hg en precipitación esta en forma reactiva (Mason et al., 1994) y es removido a la columna de agua por material particulado. El patrón de distribución superficial creado por las lluvias puede ser alterado en regiones de surgencias por la entrada de Hg enriquecido (o

agotado) en las aguas profundas (Gill y Fitzgerald, 1987). Gardner (1975) mencionó que el Hg tiene un tiempo de residencia corto en la columna de agua y presenta alta afinidad por el material suspendido y el plancton.

En nuestro estudio se encontró una gran variabilidad de concentraciones de Hg en el área de surgencias del Golfo de California, predominando principalmente las concentraciones $<1.0 \mu\text{g g}^{-1}$. Estaciones como el Puerto de Guaymas (0.01-0.55, promedio de $0.13 \pm 0.17 \mu\text{g g}^{-1}$), Santa Rosalía (0.02-0.21, promedio de $0.10 \pm 0.07 \mu\text{g g}^{-1}$) y Navachiste (0.01-0.12, promedio $0.07 \pm 0.03 \mu\text{g g}^{-1}$) no presentaron diferencias significativas entre sus concentraciones promedio.

En las costas de Baja California los eventos de surgencias ocurren a lo largo del año, presentándose con mayor intensidad en la primavera y el verano (Bakun y Nelson, 1981; Barton y Argote, 1980; Torres-Moye y Acosta Ruiz, 1986). Los fenómenos de surgencias estacionales afectan un amplio rango latitudinal del Golfo de California, siendo la parte central la zona con mayor incidencia e intensidad. Estas surgencias provocan que grandes extensiones de la zona costera del Golfo de California se enriquezcan en nutrientes (y algunos elementos traza) regenerados en las capas profundas y transportados nuevamente hacia la superficie. Por ejemplo el Cd, con un comportamiento similar a nutrientes como nitrato y fosfato en la columna de agua (Elbaz-Poulichet et al., 1987, Abe y Matsunaga, 1988, Bruland et al., 1994, de Baar et al., 1994, Abe, 2001), debe su variación temporal en las aguas superficiales con la aparición e intensidad de las surgencias y con la productividad primaria. Las concentraciones de Cd en las aguas superficiales del Golfo de California varían desde $2.3\text{-}3.9 \text{ ng L}^{-1}$ hasta máximos de $23\text{-}39 \text{ ng L}^{-1}$, mientras en el océano Pacífico Norte es

de 0.2-0.3 ng L⁻¹ (Delgadillo-Hinojosa et al., 2001). De acuerdo con Delgadillo-Hinojosa y colaboradores, el Cd enriquecido en las aguas del Golfo es mayormente acomplejado orgánicamente por el fitoplancton y removido de las capas superficiales por transporte hacia capas profundas. A una profundidad >750 m, donde se encuentra la zona de termoclina del Golfo, el Cd es mayormente remineralizado y puesto en solución. Posteriormente, este Cd es llevado nuevamente a la superficie por las surgencias. Este comportamiento para el Cd ha sido observado en otros ambientes costeros afectados por surgencias (Van Geen et al., 1992, Van Geen y Husby, 1996).

Algunos autores han encontrado incrementos de los niveles de Cd en mejillones en aguas prístinas, relacionándolo con el régimen de surgencias (Oullette, 1981; Stephenson et al., 1979; Goldberg et al., 1983). En nuestro estudio, se encontraron altas concentraciones de Cd en muestras recolectadas en franjas de las zonas costeras sin actividades antropogénicas y su nivel de concentración pudiera estar relacionado al aporte de Cd por surgencias (Figura 2). La mayoría de estos organismos se recolectaron en la parte norte del BCS (e.g. San Bruno <L.D.-5.8 promedio de 2.56±1.53 µg g⁻¹) y sur de BC (e.g. playa El Barril 0.6-6.7 µg g⁻¹ promedio de 3.2±2.0 µg g⁻¹).

Según Cutter y Cutter (1995), las concentraciones de As también tienden a incrementarse en zonas de surgencias, siguiendo un ciclo similar al fosfato. Andreae (1979) sugiere que el As particulado, es débilmente transformado en detritus, dando lugar a una acumulación lenta en las masas de aguas profundas. Dentro de este estudio, las concentraciones de As más comunes dentro de las zonas de surgencias fueron >6.0 µg g⁻¹, en localidades que tienen surgencias además de otra actividad de

aporte de As, entre ellas Playa el Maviri (3.57-7.78, promedio $5.5 \pm 1.6 \mu\text{g g}^{-1}$), Playa Guadalupe (1.96-10.19, promedio $4.97 \pm 2.7 \mu\text{g g}^{-1}$) y San Carlos (3.25-7.07, promedio $5.35 \pm 1.18 \mu\text{g g}^{-1}$).

Sin embargo, esta franja de costa también está cercana a un área con actividad hidrotermal, la cuenca de Guaymas. Estas aberturas de ventilación han sido relacionadas con el aporte de Cd y As y otros metales tal como ocurre con la actividad volcánica en tierra. Por tanto, la actividad volcánica submarina que se produce en las chimeneas hidrotermales de la cuenca de Guaymas puede ser también una fuente natural de Cd y As y otros metales en el Golfo de California (Von Damm, 1990). Aunque no es posible dilucidar la contribución al inventario de metales del Golfo de California.

9.6.1.2. Agricultura

El Cd es un elemento que se encuentra en concentraciones bajas en la corteza terrestre (0.1 a $0.2 \mu\text{g g}^{-1}$), pero puede alcanzar altas concentraciones en los suelos superficiales con influencia antropogénica (depósito atmosférico, agricultura y/o desechos domésticos). El depósito atmosférico ha sido estimado que varía desde 0.6 - $25 \text{ g ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en una zona rural a $44.4 \text{ g ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en una ciudad altamente industrializada (promedio de $19.9 \text{ g ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) (Jackson y Alloway, 1991). La mayor parte de la cuenca de captación del Golfo de California pudiera estar recibiendo el

aporte atmosférico equivalente a una zona rural (60-90% de las tierras con vegetación natural, 334,414 km²), pero también hay grandes áreas agrícolas (47,082 km²) y urbanas (1,717 km²) recibiendo aportes mayores (1 ha=0.01 km²).

El Cd derivado de la aplicación de fertilizantes fosfatados a base de rocas fosfóricas es una fuente importante. El contenido de Cd en la roca fosfórica (e.g. triple superfosfato TSP: Ca[H₂PO₄]₂) varía desde 3 a 150 g Cd ton⁻¹ (de Meeus et al., 2002) con un valor típico de 40 g ton⁻¹. Se han estimado tasas de aportes de Cd entre 3.5 a 5 g ha⁻¹ año⁻¹ de Cd en suelos agrícolas del mundo (Jackson y Alloway, 1991). En los valles agrícolas del Noroeste del país el fertilizante superfosfato simple o triple se ha usado por varias décadas, por ejemplo en el valle agrícola de Culiacán se ha estimado una tasa de aplicación de entre 3 y 10 g de Cd ha⁻¹ año⁻¹ (Soto-Jiménez et al., 2003). Además los terrenos agrícolas que reciben lodos municipales tienen un aporte adicional de 0.12 a 0.96 g ha año⁻¹.

La aplicación de fertilizantes fosfatados en México es del orden de las 300,000 toneladas por año (291,572 a 511,693 ton entre 2005-2009 se aplican a 11.2 millones de hectáreas de superficies de cultivo mecanizadas) (INEGI, 2011). Considerando la superficie mecanizada en los estados costeros del Golfo de California (2.31 millones de ha), estimamos que un 20% del fertilizante fosforado utilizado en el país es aplicado en la región. Esto permite estimar una carga total de 2.4 toneladas de Cd año⁻¹, de los cuales 1.44 y 0.6 ton de Cd año⁻¹ son depositados en los campos agrícolas de Sinaloa (con 1.31 millones de ha) y Sonora (0.56 millones de ha), respectivamente. La tasa de pérdida del Cd en el suelo por procesos erosivos y de lixiviación natural es del 30 al

100% (Jackson y Alloway, 1991), por lo que >700 kg Cd/año son potencialmente lixiviados y transportados a la zona costera.

En nuestro estudio, especímenes recolectados en las zonas costeras aledañas a los principales valles agrícolas de la región (Figura 2) presentaron alta variabilidad en las concentraciones de Cd, aunque consistentemente hacia niveles elevados en comparación con aquellos de zonas costeras sin actividad antropogénica aparente y sin la incidencia de surgencias.

Organismos recolectados en otras zonas costeras influenciadas por surgencias también presentaron altas concentraciones de Cd, sin embargo, debido a que existen otras fuentes potenciales del metal (urbanismo, agricultura y/o industria) no es posible determinar la importancia relativa de cada fuente. Un ejemplo es la del complejo lagunar Navachiste-San Ignacio-Macapule, en Sinaloa. Frente a este cuerpo costero se presentan surgencias estacionales y además se reciben aportes de Cd del valle agrícola de Guasave (aprox. 150,000 ha). En este sitio los ejemplares recolectados presentaron concentraciones desde <0.1 a máximos de 10.9 $\mu\text{g g}^{-1}$ de Cd. Se observó que el género *Caulerpa* (0.08-0.14 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) presentó las concentraciones más bajas de Cd, mientras que el género *Spyridia* (3.42-10.9 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) las más altas. Dentro de un mismo taxón, por ejemplo, en Phaeophyta (*Padina* con 0.31-0.41 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco y *Sargassum* 4.96-5.82 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) y dentro de un mismo género y especie como el *Gracilaria* (e.g. *G. vermiculophylla* 0.16-2.59 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) se observan gran variabilidad en los datos. Esto permite deducir que

nuestra hipótesis 4 no se cumple en ambientes antropogénicamente perturbados como el de Navachiste-San Ignacio-Macapule.

Miller et al., (2004) señala que en áreas de agricultura las concentraciones de Hg siempre son muy bajas. Estaciones de muestreo como el complejo Navachiste-San Ignacio-Macapule, presenta rango de concentración de 0.01-0.12, con un promedio de $0.07 \pm 0.03 \mu\text{g g}^{-1}$, donde tenemos fuentes de agricultura y surgencias, al igual que en la estación Playa Guadalupe (0.02-0.21, promedio= $0.09 \pm 0.06 \mu\text{g g}^{-1}$), en ambas estaciones las concentraciones mínimas fueron encontradas en especímenes del género *Gracilaria*, mientras que las máximas fueron en *S. sinicola* en Navachiste y *Gigartina* sp. en playa Guadalupe. Sitios como Santo Tomás, donde se encuentran fuentes de agricultura y minería se encontró un rango de concentración de 0.03 (*G. pacifica*) – 0.11 (*Sphacelaria californica*), con promedio= $0.07 \pm 0.03 \mu\text{g g}^{-1}$, no teniendo diferencias con los sitios anteriores donde además se contaba con surgencias. Comparados con sitios donde solo se cuenta con fuentes como la minera, como Punta Estrella (0.01-0.04, promedio = $0.03 \pm 0.01 \mu\text{g g}^{-1}$) y el Huerfanito (0.01-0.63, promedio= $0.15 \pm 0.14 \mu\text{g g}^{-1}$) u otras estaciones donde solo se presentaron surgencias, como es Bahía de La Paz (<LD-6.61, promedio= $1.21 \pm 1.81 \mu\text{g g}^{-1}$), se aprecia que la agricultura no ejerce un efecto significativo en las concentraciones de Hg.

Altas concentraciones de As en suelos puede provocar concentraciones elevadas de arsénico en los productos agrícolas (Talukder et al., 2011) y posteriormente este metaloide puede ser arrastrado a los diferentes cuerpos de agua, al igual que utilizarse en algunos fertilizantes como mineral primario.

Los resultados obtenidos en este estudio presentan concentraciones altas de As en sitios como Agiabampo y Playa San José, pero con muy poca cantidad de especímenes para ser comparables. En el Puerto de Guaymas se obtuvo una concentración promedio de $4.38 \pm 1.78 \mu\text{g g}^{-1}$, mientras que en sitios donde no hay agricultura se encontraron concentraciones muy similares de As como San Bruno ($4.54 \pm 2.63 \mu\text{g g}^{-1}$), Mulegé ($4.28 \pm 2.19 \mu\text{g g}^{-1}$) y Playa Cerritos ($4.39 \pm 2.29 \mu\text{g g}^{-1}$).

9.6.1.3. Desarrollos urbanos

Algunas ciudades importantes se encuentran asentadas en los valles dentro de la cuenca de captación del Golfo de California, entre las que destacan Hermosillo, Obregón y Navojoa en Sonora, y Los Mochis, Guasave y Culiacán en Sinaloa, otras están situadas en los márgenes de la zona costera como Santa Rosalía, La Paz y Los Cabos en BCS, Guaymas en Sonora, y Topolobampo y Mazatlán en Sinaloa. El aporte de elementos de estos asentamientos urbanos puede venir principalmente de la generación de residuos sólidos y por la quema de combustibles fósiles.

Prácticamente la totalidad de los vertederos de desechos sólidos urbanos y rellenos sanitarios en México son a cielo abierto y la gran mayoría sin la infraestructura para la protección del ambiente. Según datos del INEGI (2010) la generación per cápita diaria de basura en los estados del Norte del país, incluyendo los cinco costeros de BC, BCS, Sonora, Sinaloa y Nayarit, se estima en 0.86 kilogramos por habitante por día. En estos estados costeros hay un total de 12 rellenos sanitarios, de los cuales solo tres están controlados. En estos rellenos se depositan un total de 2.3 millones de toneladas de residuos sólidos por año (35% se deposita en rellenos no controlados). El Hg, Cd y

Pb en las baterías puede constituir otra importante fuente de metales, si estos artefactos llegan a los vertederos de residuos urbanos y rellenos sanitarios. Por otro lado, el desarrollo acelerado de la industria de la electrónica ha incrementado la generación de basura electrónica (e-waste), la cual contiene metales tóxicos (Soto-Jimenez y Flegal et al., 2011). Además, se estima que la generación de residuos peligrosos en la región es de 117,872 toneladas por año (86% del total de Baja California). Sin embargo, se desconoce la naturaleza química en la mayoría de los desechos.

A nivel mundial una gran cantidad de estudios han demostrado que los desechos municipales e industriales, son fuente de contaminación por nutrientes, metales, pesticidas y otros contaminantes orgánicos. La infiltración del agua de lluvia a través del depósito de residuos descubiertos arrastra consigo residuos tóxicos incluyendo al Hg, Cd y As. Parte de los metales pueden ser transportados superficialmente hacia cuerpos de agua cercanos, incluyendo lagunas costeras y mar adyacente. Además al producirse la liberación por lixiviación, el metal también migra hacia los mantos freáticos y posteriormente puede ser transportado a la zona costera vía aguas subterráneas (Olvera-Balderas, 2011). A la fecha, y a nuestro mejor conocimiento, no se han realizado estudios sobre el contenido de metales en los lixiviados de desechos urbanos e industriales en la región. Sin embargo, los niveles de concentración de estos metales deben estar directamente relacionados con la densidad de la población, actividad industrial, escorrentías continentales y estar sujeto a variaciones climáticas estacionales.

Aunque en la región del Golfo de California el riego de los cultivos con aguas residuales no es una práctica común, una proporción significativa de estos efluentes son vertidos directamente a los cuerpos de aguas costeros después de recibir un tratamiento primario o en muchos de los casos sin ningún tratamiento. Esta fuente de aporte, aunque menor a las otras mencionadas, contribuye al inventario total de metales en los ecosistemas costeros del Golfo.

En cuanto a concentraciones de Hg obtenidas en sitios con desarrollo urbano y surgencias como fuente de aportes de elementos traza, tales como Hermosillo (0.05-0.15 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco, promedio=0.08 \pm 0.03 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco), Santa Rosalía (0.03-0.23 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco, promedio=0.10 \pm 0.07 $\mu\text{g g}^{-1}$), Mazatlán (0.01-2.11 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco, promedio=0.22 \pm 0.34 $\mu\text{g g}^{-1}$) y Bahía de la Paz (0.01-6.61 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco, promedio=1.21 \pm 1.81 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco), los valores promedio fueron significativamente diferentes solo para la Bahía de la Paz. En sitios con aporte de agricultura, como lo son las costas de Obregón-Navojoa (0.02-0.37 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco, promedio=0.11 \pm 0.08 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) y Topolobampo (0.05-0.8 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco, promedio=0.17 \pm 0.18 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco), fueron comparables a los El Huerfanito (0.01-0.63 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco, promedio=0.15 \pm 0.14 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) pero menores a los de Punta Estrella (0.01-0.04 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco, promedio= 0.03 \pm 0.01 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) considerado prístino. El aporte urbano aunado con el de otra fuente resulta en concentraciones significativamente más elevadas que en aquellos sitios donde no hay un aporte puntual.

Para el Cd, se encontraron concentraciones más elevadas en sitios y estaciones adyacentes a Hermosillo (1.42-9.07 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco, promedio=3.42 \pm 2.41 $\mu\text{g g}^{-1}$ de

peso seco) y Obregón ($0.35-15.83\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco, promedio= $3.55\pm 3.5\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco), que en otros sitios con desarrollo urbano por ejemplo Bahía de la Paz ($0.04-8.59\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco, promedio= $1.61\pm 1.72\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco), al igual que en sitios prístinos como Punta Estrella ($0.04-7.14\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco, promedio= $2.40\pm 1.67\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco). En estos sitios la agricultura es la actividad que incrementa significativamente el aporte de Cd y el desarrollo urbano no contribuye de manera significativa.

Para el As, encontramos concentraciones elevadas principalmente en estaciones cercanas a Obregón ($0.17-15.56\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco, promedio= $5.72\pm 3.87\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco), manteniéndose similar su concentración en otros sitios con alto desarrollo urbano, como pueden ser Mazatlán ($2.7-13.0\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco, promedio= $3.89\pm 1.77\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) y sitios con escasa población urbana Santa Rosalía ($1.64-6.65\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco, promedio= $3.95\pm 1.3\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco), al igual que en sitios sin desarrollo urbano como Punta Estrella ($3.02-8.98\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco, promedio= $3.85\pm 1.58\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) o el Huerfanito ($3.02-11.7\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco, promedio= $5.24\pm 2.63\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) con escasa actividad humana. A menos que las fuentes de metal a estos sitios sea vía atmosférica desde otras regiones del Golfo como puede ser el valle de Hermosillo.

9.6.1.4. Actividad industrial y quema de combustibles fósiles

Entre las fuentes emisoras de metales también se incluye la combustión de los derivados del petróleo, en particular el combustóleo, el residuo pesado de la refinación

que se emplea como combustible para las termoeléctricas. En la región del Golfo se tiene una producción total de 2,167 MW (CFE, 2011) con un consumo de 3.152 millones de TM de combustóleo (CFE, 2011). Considerando los factores de emisión de 0.017 g de Cd ton^{-1} de combustóleo, 0.68 g de As ton^{-1} y de 13.3 mg de Hg ton^{-1} (Acosta et al., 2003) estimamos una emisión mínima de 53.6 kg de Cd, 2143 kg de As y 43.6 kg de Hg al año. Sin embargo, cuando se considera la concentración típica del Cd (0.3 g ton^{-1}) y As (18.8 g ton^{-1}) en el combustóleo y una tasa de pérdida a la atmósfera del 25-30%, las emisiones se elevan a 283.7 kg de Cd y 17,770 kg de As por año. Caso contrario del Hg con 4 mg ton^{-1} y una emisión cercana al 100% (bajo punto de vaporización), el flujo de emisión estimado disminuye a 12.7 kg año^{-1} . Otras fuentes incluyen la quema de combustibles ligeros por vehículos automotores; sin embargo, este aporte no ha sido estimado hasta la actualidad.

En el caso de Hg, las concentraciones obtenidas en las macroalgas recolectadas en los sitios de muestreo donde se encuentran termoeléctricas como fuente de aporte, Mazatlán (0.03 – 2.11 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco, con promedio=0.22±0.34 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco), Puerto de Guaymas (0.01-0.55 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco, promedio=0.10±0.12 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco), Puerto Libertad (0.01-0.21 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco, promedio=0.09±0.05 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco), Topolobampo (0.05-0.8 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco, promedio=0.17±0.18 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) y Bahía de la Paz (0.01-6.61 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco, promedio=1.21±1.81 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco), los valores no variaron entre sí, con excepción de Mazatlán y Bahía de la Paz, donde se encontraron valores muy por encima del valor del promedio de referencia. En estos sitios, además de las

termoeléctricas, el aporte de Hg puede ser por surgencias. Sitios donde no cuentan con aporte de termoeléctricas ni surgencias presentaron promedios similares a los puertos mencionados anteriormente, Alfonsina ($0.05-0.61 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco, promedio= $0.21\pm 0.22 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) y El Huerfanito ($0.01-0.63 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco, promedio= $0.15\pm 0.14 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco).

En nuestro estudio se observaron concentraciones relativamente altas de Cd en macroalgas recolectadas en los puertos de Guaymas (<L.D. a $6.24 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco, $2.38\pm 1.8 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco), La Paz (<0.1 a $8.59 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco; $1.61\pm 1.72 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco), Mazatlán (<L.D. a $8.2 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco; $2.0\pm 2.0 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) y Topolobampo (0.2 a $8.26 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco; $1.57\pm 1.16 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco). A pesar de la influencia de las termoeléctricas, los valores promedios de Cd en los organismos recolectados en estos puertos no son diferentes a los recolectados en las costas del sur de BC y norte de BCS con influencia de surgencias. Más aún, en el puerto de Topolobampo donde se recibe el aporte de Cd adicional por la agricultura, tampoco se observaron diferencias significativas. Aún así, se observaron especímenes con valores extremos y anómalos, muy por encima de los promedios basales.

La dilucidación de fuentes de metales en ambientes donde convergen varias fuentes y la contribución a la acumulación por las macroalgas es una tarea muy compleja. En el caso específico de Cd, es recomendable y técnicamente posible, el análisis de sus isotopos estables (e.g. $^{114}\text{Cd}/^{110}\text{Cd}$) con fines de identificar el origen del metal y trazarlo en el medio natural, en particular en las macroalgas seleccionados como biomonitores en este trabajo.

Para las concentraciones de As encontradas en este estudio en los sitios con termoeléctricas establecidas, se obtuvo que para Mazatlán (2.7-13.00 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco, promedio $3.89 \pm 1.77 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) y Bahía de la Paz (2.67-9.83 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco, promedio $3.74 \pm 1.36 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) se encontraron en promedio los valores más bajos; sin embargo, en sitios como en el Puerto de Guaymas (2.0-8.62 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco, promedio $4.44 \pm 1.95 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco), en Puerto Libertad (2.49-7.89 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco, promedio $4.53 \pm 2.2 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) y Topolobampo (3.57-7.78 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco, promedio $5.5 \pm 1.6 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) se encontraron los valores extremos más altos dentro del Golfo de California, los cuales son similares entre ellos. En otros sitios sin aporte de termoeléctricas, como en Bahía Kino, donde sus aportes son las surgencias y la agricultura, se encontraron valores bajos (1.85-3.3 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco, promedio $=2.66 \pm 0.51 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco), en otros sitios con aporte de surgencias sin agricultura, como Mulegé (2.32-14.84 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco, promedio $=4.28 \pm 2.19 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) se encontraron valores similares a los sitios con aporte de quema de combustibles; en otro sitio, que se considera prístino, donde no hay aporte de surgencias, ni agricultura, contando con un aporte de minería muy escaso, es el Huerfanito (3.02-11.7 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco, promedio $=5.24 \pm 2.63 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) donde se encontraron valores similares a los mencionados anteriormente. Por lo que se considera que el aporte de elementos traza es mayormente afectado por aporte natural, siendo enriquecido por actividades antropogénicas.

9.6.1.5. Actividad minera

La minería en Sinaloa y Sonora data desde el siglo XVI con el descubrimiento de yacimientos de oro, plata, plomo, zinc, cobre y molibdeno. La producción minera en Sonora sigue siendo muy importante hoy en día siendo el principal estado productor de oro (16.576 ton año⁻¹), de cobre (162,580-177,155 ton año⁻¹), y molibdeno (7,812 - 9,866 ton año⁻¹), además es uno de los principales productores de plata (286.065 ton año⁻¹). Sinaloa también ocupa un lugar importante en la producción nacional de hierro (207,547ton año⁻¹) y de metales no ferrosos como Ag (25.807-31.789 ton año⁻¹), Pb (1,845-4,290 ton año⁻¹) y Zn (4,108-5,785 ton año⁻¹). A la explotación de galena-argentífera viene asociado el Cd y en ocasiones el As. Según la producción en ambos estados se estima una producción de >1.15 millones de TM de jales por año (250 g de plata por ton de roca mineral) en Sonora y >103,000 TM en Sinaloa. Los jales mineros pueden contener altas concentraciones de Cd y As y otros metales (Balderas-Olvera, 2011).

Históricamente los jales han sido depositados en las laderas de cerros y/o en las cañadas aledañas a las minas. Aunque la mayoría de las minas de Sonora y Sinaloa se ubican en la colindancia con la Sierra Madre Occidental, es decir, relativamente alejadas de la zona costera, el transporte eólico e hídrico moviliza estos materiales de desecho cuenca abajo. En los cinco estados que bordean al Golfo de California se localizan algunas de las minas más productivas dentro de las cuencas de captación de los ríos o arroyos más importantes de la región desembocando directamente al Golfo (Figura 2). En jales sulfurosos como los generados en la región minera centro-norte del país, se produce drenaje ácido por formación de H₂SO₄. Los minerales también

reaccionan transformándose en otras formas químicas más oxidadas con enlaces químicos menos fuertes, y por tanto, más fácilmente disponibles para la biota (Olvera-Balderas, 2011). Los metales pueden ser lixiviados y transportados vía aguas superficiales y subterráneas a las zonas costeras.

La llegada de tales elementos ha quedado demostrado por la presencia de plomo de minería en el sistema lagunar Altata-Ensenada del Pabellón, el cual ha sido históricamente explotado en las sierra de Sinaloa (Soto-Jiménez et al., 2006). Un estudio reciente, ha dado cuenta del transporte de metales como el Hg y Cd desde un distrito minero ubicado en la cuenca alta del río Baluarte hacia la zona costera (Ruelas-Inzunza et al., 2011). Sin embargo, en el estado de Sonora con minas muy distantes a las costas y dada la falta de ríos importantes en la región, el transporte de jales hacia las costas es menos probable. No así el transporte eólico. Ninguno de nuestros resultados permite evidenciar la adición de Cd u otros metales a los ecosistemas costeros debido a que prácticamente en ninguna región se encontró la influencia sola de la minería. En la Bahía La Cholla ($0.5-6.3 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco; $2.12 \pm 1.78 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco), cercano a Puerto Peñasco aparentemente esta dentro de la cuenca de captación de un importante distrito minero de Sonora, sin embargo, al comparar las concentraciones de este lugar con los de la playa Punta Estrella y San Felipe ($0.11-7.14 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco; $2.4 \pm 1.63 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco), a la misma latitud pero con una actividad minera menor, no se observaron diferencias. Lo cual se puede deber a que los desechos si bien pudieran estar enriquecido con metales, su fracción dominante puede ser la sólida o suspendida y no la disuelta.

En Baja California Sur se tiene el distrito minero El Triunfo-San Antonio en el que se ha explotado principalmente para la extracción de Ag desde 1748, pero que contiene también Au, As, Cu, Pb, Zn, W y Mo. Aunque la producción a gran escala se detuvo desde a 1958, hoy en día se encuentran jales dispersos (2.5-3% de As en peso) y desechos de la minería que incluyen fundición y escorias enriquecidos en arsénico (de entre 3-4%) y en otros metales incluyendo Pb y Zn (3-4% en peso). Hay evidencias de que estos materiales están siendo arrastrados cuenca abajo a través del arroyo San Antonio con niveles de 250-300 $\mu\text{g g}^{-1}$ en la parte alta a mínimos <L.D. a 10 $\mu\text{g g}^{-1}$ en el valle de Los Planes, e incluso valores de consideración en la plataforma continental aledaña a 10-25 m de profundidad (7.6-40 $\mu\text{g g}^{-1}$ de As)(Posada-Ayala, 2011). Al analizar especímenes de *Sargassum sinicola* y *S. muticum* recolectados en su costa adyacente (en la playa de Punta Arena La Ventana), encontramos niveles de As entre 7.42-10.47 $\mu\text{g g}^{-1}$. Estos valores son dos veces mayores a las establecidas como valores de referencia de As en la zona de 3.55 $\mu\text{g g}^{-1}$.

En Santa Rosalía se vertieron intencionalmente miles de toneladas de escoria vidriada al mar adyacente. Estas escorias han sido re-trabajadas y depositadas en las playas de la región dándole una coloración negruzca a las arenas. Sin embargo, el metal contenido dentro de esta escoria de fundición es prácticamente no biodisponible. Estudios previos en la zona, registran concentraciones de Cd en *P. durvillae* de 3.6±1.6 $\mu\text{g g}^{-1}$ (1.45-9.1 $\mu\text{g g}^{-1}$) (Rodríguez-Figueroa et al., 2009). Nuestros resultados para la misma especie son comparables promediando 2.43±1.1 $\mu\text{g g}^{-1}$ (1.21-3.24 $\mu\text{g g}^{-1}$). Otras especies incluyeron al *S. sinicola* con 1.19±0.8 $\mu\text{g g}^{-1}$ (0.06-1.93 $\mu\text{g g}^{-1}$) y al género *Ulva* 1.44±1.55 $\mu\text{g g}^{-1}$ (0.02-3.1 $\mu\text{g g}^{-1}$). Estos valores no son distintos a los encontrados en

otros sitios no impactados de la región, lo cual confirma la no disponibilidad de los metales. Rodríguez-Figueroa et al., (2009) tampoco encontraron evidencia de contaminación por otros metales en macroalgas, incluyendo al Pb, Cu y Co.

9.7. Composición, morfología y fisiología de las macroalgas en la captación de elementos traza

Las macroalgas exhiben diferentes afinidades hacia los diferentes elementos, lo cual depende entre otros aspectos, de la estructura química del bioabsorbente (Hamdy 2000). Además, la concentración varía en diferentes porciones de la planta, siendo generalmente más altas en las partes más viejas de las algas y más bajas en las áreas de rápido crecimiento, debido que las partes más viejas han sido expuestas por más tiempo que el tejido más recientemente formado (Farías et al., 2002).

Los metales son tomados por las algas por medio de transporte activo y pasivo. Algunos metales son adsorbidos y absorbidos pasivamente por los polisacáridos y aminoácidos presentes en la pared celular y en la matriz intracelular (Morris y Bale, 1975; Eide et al., 1980). Otros metales son tomados en forma activa contra los altos gradientes de concentración intracelular (Eiden et al., 1980). Las macroalgas tienen diferentes sitios de unión de metal en las paredes celulares, entre los que destacan los grupos carboxilos y sulfhídricos de los aminoácidos y polisacáridos.

Como se mencionó anteriormente, la estructura química de las macroalgas definen su afinidad por los elementos traza, en particular la pared celular juega un papel importante en la captación del metal por su alta concentración de polisacáridos

(Davis et al., 2003b). Por ejemplo, se ha observado que en las algas cafés la composición de su pared celular (alginatos) es la responsable de su capacidad de intercambiar iones, dando lugar a una selección de metales (Davis et al., 2003). La capacidad de secuestrar Cd por las algas cafés se debe principalmente a la concentración y composición del ácido alginico (Davis et al., 2003b; Mata et al., 2009) y puede ser diferente entre las especies debido a las fluctuaciones temporales y anuales, condiciones locales o características de las especies (Hernández-Carmona, 1985; Pérez-Reyes, 1997). El alginato es la sal del ácido alginico, el cual está presente como un gel dentro de la pared celular y mucilago, o material intracelular (Chapman y Chapman, 1980). En este estudio algunas algas feofitas presentaron diferencias en cuanto a la concentración de Hg, Cd y As, las diferentes especies de *Sargassum* fueron las más abundantes (e.g. *S. sinicola*, *S. johnstonii*, *S. horridum*, *S. Herporhizum*) encontrándose distribuido en todas las regiones del Golfo de California, presentando valores de concentración para el Cd de 0.06-10.6 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco, con promedio de $3.63 \pm 2.36 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco, para la especie *Hydroclathrus clathratus*, (0.06-4.25 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco, promedio = $1.04 \pm 1.21 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) la cual solo se encontró en la parte sur de BCS, para *Padina durvillae* (0.46-6.27 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco, promedio = $2.97 \pm 1.33 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) predominando su presencia en BCS y Sinaloa y para *Colpomenia tuberculata* (0.05-9.56 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco, promedio = $2.66 \pm 1.97 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) encontrándose en todas las regiones, con excepción de la R2, apreciándose las diferencias del promedio de concentraciones dependiendo del lugar de muestreo y de la especie recolectada.

Para las concentraciones de Hg, en las especies como el *Hydroclathrus clathratus* ($0.04-5.61 \mu\text{g g}^{-1}$, promedio= $0.82 \pm 1.72 \mu\text{g g}^{-1}$), *Padilla durvillae* ($0.01-2.09 \mu\text{g g}^{-1}$, promedio= $0.26 \pm 0.45 \mu\text{g g}^{-1}$) y *C. tuberculata* ($0.02-1.75 \mu\text{g g}^{-1}$, promedio = $0.19 \pm 0.28 \mu\text{g g}^{-1}$), se observa que se tienen concentraciones de promedio más bajas que para las concentraciones de Cd, por lo que las mismas especies presentan diferente afinidad para diferentes metales o bien el metal no se encuentra disponible en el medio, a su vez presentan diferencias entre los valores de las mismas.

En cuanto a los valores de concentración promedio de As, las diferentes especies del género *Sargassum*, presentaron un rango de concentración desde $1.96-15.56 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco, con un promedio= $6.17 \pm 3.00 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco, para *C. tuberculata* ($1.72-5.35 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco, promedio= $3.69 \pm 0.74 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco), para *Padina durvillae* ($1.64-5.53 \mu\text{g g}^{-1}$ con promedio = $3.45 \pm 0.82 \mu\text{g g}^{-1}$) y para *Hydroclathrus clathratus* ($3.48-5.62 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco, promedio = $4.21 \pm 0.86 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco), observándose que las feofitas tuvieron mayor afinidad para metales tales como el Cd y As, siendo menor para Hg.

En las algas clorofitas (e.g. *U. lactuca*) la estructura de la pared celular consiste principalmente de polisacáridos cargados negativamente, la cual presenta un número de sitios de unión con diferente afinidad de metales. Se considera a esta división como un buen biomonitor de contaminación, debido su estructura de tallos delgada y simple, por su gran radio de absorción que presentan, así como por su estructura celular uniforme (Ho, 1990). Son tolerantes a grandes rangos de salinidad y crecen bien en

los estuarios donde los niveles de salinidad cambian con las mareas, pudiendo crecer en niveles más altos o más bajos que el agua de mar (Yamashita et al., 2009).

En este estudio el género *Ulva* fue el más representativo de las algas clorofitas, encontrándose en todas las regiones y no presentando diferencias significativas entre todas ellas, para los valores de concentración de Cd; algunas especies de este género son *U. lactuca* (0.03-3.73 $\mu\text{g g}^{-1}$, promedio=1.30 \pm 0.92 $\mu\text{g g}^{-1}$), *U. flexuosa* (0.26-5.68 $\mu\text{g g}^{-1}$, promedio=1.64 \pm 1.48 $\mu\text{g g}^{-1}$), *U. intestinalis* (0.29-4.77 $\mu\text{g g}^{-1}$, promedio=1.21 \pm 1.11 $\mu\text{g g}^{-1}$), otras especies de algas clorofitas fueron *Codium ampliviseculatum* (0.27-2.30 $\mu\text{g g}^{-1}$, promedio=1.12 \pm 0.62 $\mu\text{g g}^{-1}$) y *Codium simulans* (0.12-1.89 $\mu\text{g g}^{-1}$, promedio=1.06 \pm 0.54 $\mu\text{g g}^{-1}$).

En cuanto a la concentración promedio de Cd de las algas clorofitas y feofitas, si hay diferencia significativa entre ellas, siendo mayor los valores de concentración para las algas feofitas.

Para los valores de concentración de Hg, no se encontraron diferencias significativas entre las algas feofitas y clorofitas como se aprecia con las concentraciones que expresan las siguientes especies: *U. lactuca* (0.1-3.59 $\mu\text{g g}^{-1}$, promedio=0.26 \pm 0.61 $\mu\text{g g}^{-1}$), *U. flexuosa* (0.03-4.43 $\mu\text{g g}^{-1}$, promedio=0.50 \pm 1.20 $\mu\text{g g}^{-1}$) y *C. ampliviseculatum* (0.02-0.36 $\mu\text{g g}^{-1}$, promedio=0.13 \pm 0.12 $\mu\text{g g}^{-1}$).

En sitios donde se encontraron tanto algas feofitas como clorofitas (Playa Lobos) se observó cómo las algas feofitas presentan concentraciones más altas para el As que las clorofitas encontradas en esa localidad; otra localidad donde se encontraron diferentes especies de diferentes divisiones, fue Punta Estrella, donde las algas

clorofitas presentaron, en un espécimen, un valor alto de As, seguido por las feofitas y las rodofitas.

En las algas rodofitas, la pared celular consiste en una capa interna rígida compuesta por microfibrillas y una capa externa amorfa compuesta por mucilago. Su principal componente en la capa interna de la pared celular, de la mayoría de las algas rodofitas, es la celulosa; para la capa amorfa de la pared celular generalmente son los polímeros galactanos sulfatados de diferentes tipos, tales como agar, carragenanos, etc., dependiendo de la especie, edad, época y origen del alga.

Para las concentraciones de Cd entre las algas rodofitas del Golfo, si presentan entre ellas diferencias, como por ejemplo: *Gigartina* sp. (0.73-15.83 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco, promedio=3.98 \pm 5.13 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) localizada en la R1 y 4, *Spyridia filamentosa* (0.68-8.26 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco, promedio=3.02 \pm 1.93 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) en la R2, 3 y 4 y *G. vermiculophylla* (0.02-4.06 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco, promedio=1.39 \pm 1.28 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) en la R3 y 4. Para las concentraciones de Hg se tiene gran variabilidad entre especies, por ejemplo: *G. vermiculophylla* (0.01-6.61 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco, promedio=0.81 \pm 1.72 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco), *S. filamentosa* (0.02-4.13 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco, promedio=0.79 \pm 1.40 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) y *Gigartina* sp. (0.01-0.21 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco, promedio=0.09 \pm 0.07 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco); encontrándose que mientras la misma especie (e.g. *G. vermiculophylla*) puede concentrar menos Cd en comparación con las otras especies, al mismo tiempo concentra más Hg que las otras especies.

10. Conclusiones

1. En las áreas donde se encuentran fuentes puntuales de Hg, como son termoeléctricas en operación, las concentraciones de Hg en los especímenes recolectados fueron significativamente más elevadas que en aquellos sitios donde no hay tal actividad. Esto fue más evidente en la Bahía de La Paz, BCS y en Mazatlán, Sinaloa. En el caso de la Bahía de Guaymas y la zona costera de San Carlos, ambos en Sonora, no fue tan evidente debido a que probablemente las muestras fueron recolectadas muy cerca de la chimenea de las plantas termoeléctricas y el depósito ocurre a mayores distancias.
2. Para el Cadmio, las concentraciones más elevadas fueron encontradas principalmente en la parte central del Golfo de California (al Norte de Sinaloa y de BCS, y al Sur de Sonora y de BC). Esto cubre un rango latitudinal donde se encuentra en el área con mayor actividad hidrotermal del golfo.
3. El As presenta altas concentraciones en la parte norte del estado de BCS y la parte Sur de Sonora y Norte de Sinaloa. En la primera zona se localiza una importante zona minera rica en sales de arsénico (Región Minera El Triunfo) y cuyos desechos fluyen hacia la zona costera en donde se localizan los especímenes con mayores concentraciones de As. En la otra zona, se practica la crianza de animales de engorda como aves de corral y cerdos con mayor intensidad del país. Principalmente en el Valle del Mayo. Como es sabido, se usan compuestos arsenicales en el alimento balanceado para la prevención de parásitos para evitar que reduzcan las tasas de crecimiento de los animales en cría.

4. Respecto a la hipótesis que las diferentes especies de macroalgas localizadas en un mismo sitio presentarían concentraciones similares del metal entre sí, se concluye que esta premisa se cumple en la mayoría de los sitios estudiados. Es decir, en las mismas estaciones las diferentes especies presentan concentraciones en un mismo rango, sin haber diferencias significativas entre ellas. Exceptuando, aquellos sitios con fuentes puntuales del metal, lo cual podría estar asociado a las tasas de crecimiento y morfología de las macroalgas.
5. En cuanto a la premisa planteada que los especímenes de una misma especie y/o género tendrían diferencias en sus concentraciones en respuesta al grado de exposición, se concluye que en general si hay una mayor concentración en zonas con fuentes puntuales de aporte y una disminución en sitios donde no las hay.
6. En este estudio las concentraciones de referencia para cada metal de las macroalgas en general aquí estudiadas fueron: Hg=0.055±0.03 $\mu\text{g g}^{-1}$, Cd=0.05±0.03 y As=3.35±0.13 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco.
7. El rango de concentración de Hg en macroalgas del Golfo de California fué muy amplio (desde 0.01 hasta 6.61 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco). Las concentraciones de Hg encontradas en este estudio fueron, en general, más altas a las registradas en la literatura en otras regiones del mundo (desde ND hasta 4.68 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco), así como aquellos encontrados previamente dentro del Golfo de California (0.016-0.134 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco). Las mayores concentraciones de Hg (e.g. >1.00 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco), se encontraron en lugares donde está establecida una termoeléctrica como fuente puntual de aporte del metal. En las lagunas

costeras de Sinaloa en las que no hay una fuente puntual de Hg, el rango de concentración de este metal ($0.01-0.81 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) fue menor a de los lugares más impactados del Golfo. Sin embargo, en Ohuira-Navachiste y principalmente en el Estero de Urías se encontraron concentraciones mayores a $1.00 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco en estaciones tanto cercanas como alejadas a la fuente puntual. El viento actúa como un factor determinante en el depósito del metal por vía atmosférica.

8. Se observó el siguiente orden en los niveles de Hg en macroalgas, dentro del GC, según su taxón: Rhodophyta ($0.30 \pm 0.813 \mu\text{g g}^{-1}$) > Chlorophyta ($0.20 \pm 0.49 \mu\text{g g}^{-1}$) > Phaeophyta ($0.17 \pm 0.41 \mu\text{g g}^{-1}$).
9. Las macroalgas del Golfo de California presentan un amplio rango de concentraciones de Cd (desde 0.01 hasta $15.83 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco), siendo las mayores aquellas localizadas en la parte central del Golfo de California (Norte de Sinaloa y BCS, Sur de Sonora y BC). Este rango de concentraciones para Cd es comparable con otros estudios realizados en el mundo ($0.011 - 16.32 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) pero están por encima de los encontrados previamente en el Golfo de California ($0.1-9 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco). En las lagunas costeras se encontraron altas concentraciones ($>3.0 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) principalmente en Navachiste, Santa Ma. La Reforma y en el Estero de Urias. En esta última laguna se encontraron altas concentraciones ($>3.00 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) en las estaciones UR11 a UR14 cercanas a asentamientos humanos, pero con influencia marina. Se observó el siguiente orden en los niveles de Cd en

macroalgas del GC, según su taxón: Phaeophyta ($3.00 \pm 2.04 \mu\text{g g}^{-1}$) > Rhodophyta ($2.51 \pm 2.00 \mu\text{g g}^{-1}$) > Chlorophyta ($1.33 \pm 1.32 \mu\text{g g}^{-1}$).

10. Las macroalgas del Golfo de California presentan también un amplio rango de concentraciones de As con valores desde 0.17 hasta 80.04 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco. Los resultados obtenidos en este son comparables con los encontrados en la literatura para otras regiones alrededor del mundo (0.87-242 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) y para los encontrados en el Golfo de California (3.0-77.0 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco). Las concentraciones más altas se encontraron en especímenes recolectados en la parte norte de Sinaloa y en BCS. La concentración promedio de As de las macroalgas según su taxón fue: Phaeophyta ($4.89 \pm 2.52 \mu\text{g g}^{-1}$) > Chlorophyta ($4.59 \pm 7.07 \mu\text{g g}^{-1}$) > Rhodophyta ($3.67 \pm 1.21 \mu\text{g g}^{-1}$).

11. La variabilidad para las diferentes concentraciones de elementos traza dentro del Golfo de California, fue mayor para el As (0.17-80.04 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco), seguida del Cd (0.01-15.83 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) y del Hg (0.01-6.61 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco).

11. Bibliografía

Abbot I., Hollenberg, G., (1976). Marine algae of California. Standford University Press, Standford CA, pp. 827.

Abe, K., (2001) Relationship between Cd and PO₄ in the subtropical Sea near the Ryukyu Islands. *Journal of Oceanography*, Vol. 58:577-588.

Abe, K., Matsunaga, K., (1988). Mechanism controlling Cd and PO₄ in Funka Bay, Japan. *Marine Chemistry* 28:325-331.

Acosta-Ruiz, G., Powers, B., (2003). Preliminary atmospheric emissions inventory of Mercury in Mexico. 12th International Emission Inventory Conference Emission Inventories-Appling New Technologies. San Diego, April 29–May 1, 2003.

Akcali I., Kucuksezgin F., (2011). A biomonitoring study: Heavy metals in macroalgae from eastern Aegean coastal areas. *Marine Pollution Bulletin* 62 637–645

Algae-Base. (2011). Consultado en mayo del 2011 del sitio <http://www.algaebase.org>.

Andreae M.O., Klump, D., (1979). Byosynthesis and release of organoarsenic compounds by marine algae. *Environmental Sciece Technology* 13:738-714.

Astorga-España, Ma. S., Calisto-Ulloa, N. C., Guerrero, S.. (2008). Baseline concentrations of trace metals in macroalgae from the strait of Magellan, Chile. *Bull Environmental Contamination and Toxicology* 80:97–101.

Bakun, A., N., C.S., (1977). Climatology of upwelling related processes off Baja California. *Ca1COFI Reports* XIX 107-127.

Barton, E.D., Argote, M.L., (1980). Hydrographic variability in an upwelling area off northern Baja California in June 1976. *Journal of Marine Research* 38:631-649.

Bluo-Olayan, M.N., Subrahmanyam, V., (1996). Heavy metals in marine algae or the Kuwait coast. *Bulletin of Enviromental Contamination and Toxicology* 57:816-823.

Bruland, K.W., Orians, K.J and Cowen, J.P., (1994). Reactive trace metals in the stratified central North Pacific. *Geochemistry Cosmochemistry* 58:3171-3182.

Bryan, G.W., and Hummerstone, L.G. (1973). Brown seaweed as an indicator of heavy metals in estuaries in south-west England. *Journal of the Marine Biology Association of the United Kingdom* 53: 705-720.

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

Caliceti, M., Argese, E., Sfriso, A., Pavon, B., (2002). Heavy metal contamination in the seaweeds of the Venice lagoon *Chemosphere* 47, 443–454

Canet, C., Prol-Ledesma, R. M., Torres-Alvarado, I., Gilg, H.A., Villanueva, R.E., Lozano-Santa Cruz, R., (2004). Silica-carbonate stromatolites related to coastal hidrothermal venting in Bahía Concepción, Baja California Sur, México: *Sedimentary Geology* 174, 97-113.

CFE. Comision Federal de Electricidad (2011). Disponible en <http://www.cfe.gob.mx/QuienesSomos/estadisticas/listadocentralesgeneradoras/paginas/termoelectricas.aspx>

Coelho, J.P., Pereira, M.E., Duarte, A., Pardal, M.A., (2005). Macroalgae response to a mercury contamination gradient in a temperate coastal lagoon (Ria de Aveiro, Portugal). *Chemistry Estuarine, Coastal and Shelf Science* 65, 492-500.

Cutter, G.A., Cutter, Lynda S., (1995). Behavior of dissolved antimony, arsenic, and selenium in the Atlantic Ocean. *Marine Chemistry* 49:295-306.

Davis, T.A., Volesky B., Mucci, A., (2003). A review of the biochemistry of heavy metals biosorption by brown algae. *Water Research* 37: 4311-4330.

De Baar, H. J. W., Saager, P.M., Nolting, R.F., Van Der Meer, J. (1994). Cadmium versus phosphate in the world ocean. *Marine Chemistry* 46:261-281.

De León-Chavira F., Huerta-Díaz, M.A., Chee-Barragan, A., (2002). New methodology for extraction of total metals from macroalgae and its application to selected samples collected in pristine zones from Baja California, Mexico. *Bulletin Environmental Contamination and Toxicology* 70:09-816.

De Meeus, C., Eduljee, G.H., Hutton, M., (2002). Assessment and management of risk arising from exposure to cadmium in fertilizers I. *The Science or the Total Environment* 291:167-187.

Delgadillo – Hinojosa, F., Macias-Zamora J. V., Segovia-Zavala J. A., Torres-Valdes S. (2001), Cadmium enrichment in the Gulf of California, *Marine Chemistry* 75, 109-122.

Eide, I. S. Myklestad, Melson S., (1980). Long-term uptake and release of heavy metals by *Ascophyllum nodosum* (L.) Le Jol. (Phaeophyceae) in situ. *Bulletin Environmental Contamination and Toxicology* 23:19-28.

Elbaz Poulichet, F., Martin, J.M., Huang, W.W., Zhe, J.X. (1987). Dissolved Cd behavior in some selected French and Chinese estuaries. Consequences on Cd supply to the ocean. *Marine Chemistry* 22:125-136.

Espinoza-Avalos, J.,(1996).Distribution of seagrasses in the Yucatan Peninsula, Mexico. *Bulletin of Marine Science* 59 (2) pp. 449-454.

Farias, S., Smichowski, P., Velez, D., Montoro, R., Curtosi, A., Vodopivec, C., (2007), Total and inorganic arsenic in Antarctic macroalgae. *Chemosphere* 69:1017-1024.

Ferreira, J.G., (1991), Factor governing mercury accumulation in three species of marine macroalgae. *Aquatic Botany* 39:335-343.

Forrest, M. S., Ledesma-Vazquez, J., Ussler W., III, Kulongoski, J. T., Milton, D. R., Greene, H.G., (2005). Gas geochemistry of shallow submarine hydrothermal vent associated with El Requeson fault zone in Bahia Concepcion, Baja California Sur, Mexico: *Chemical Geology* 224:82-95.

Forstner, U., y G.T.W. Wittmann, (1979). *Metal pollution in the aquatic environment*. Springer-Verlag, Berlin. New York 485 pp.

Gardner, D., (1975). Observations on the distribution of dissolved mercury in the ocean. *Marine Pollution Bulletin* 6:43-46.

Goldberg, E.D., Koide, M., Hodge, V., Flegal, A.R., Martin, J.H., (1983). U.S. Mussel Watch: 1977-198 results on trace metals and radionuclides. *Estuarine Coast Shelf Science* 16:69-93.

Gosavi, K., Sammut, J., Giffor S., Jankowski, J., (2004). Macroalgal biomonitors of trace metal contamination in acid sulfate soil aquaculture ponds, *Science of the Total Environment* 324 25–39

Green-Ruiz, C., Ruelas-Inzunza, J., Páez-Osuna, F., (2005). Mercury in surface sediments and benthic organisms from Guaymas Bay, east coast of the Gulf of California. *Environmental Geochemistry and Health* 27: 321–329

Greene, H.G., Forrest, M.J., (2002), Emanación hidrotermal de gases en aguas someras a lo largo de una falla sobre y fuera de la costa; Bahía Concepción, Baja California Sur, Mexico y su influencia en la geología y biología del fondo marino (resumen), en VI International Meeting on Geology of the Baja California Peninsula: La Paz, Baja California Sur.

Gueven KC, Saygi N, Oeztuerk B., (1993). Survey of metal contents of Bosphorus algae, *Zostera marina* and sediments. *Botanica Marina* 36:175 –178.

Gueven KC, Topcuoglu S, Kut D, Esen N, Erentuerk N, Saygim N, Cevher E, Guevener B, Oeztuerk B., (1992). Metal uptake by Black sea algae. *Botanica Marina* 35:337 –340

Hagerhall B.,(1973). Marine botanical-hydrographical trace element studies in the Oresund area. *Botanic Marine* 16:53 –64.

Hamdy, A.A., (2000). Biosorption of heavy metals by marine algae. *Current Microbiology* 41:232-245.

Haritonidis S, Malea P., (1999). Bioaccumulation of metals by the green alga *Ulva rigida* from Thermaikos Gulf, Greece. *Environmental Pollution* 104:365 –372.

Hernández-Carmona, G., (1985). Variación estacional del contenido de alginatos en tres especies de feofitas de Baja California Sur, México. *Investigaciones Marinas CICIMAR* 2,30-45.

Hernández-Tovalin, O. A., (2009). Estudio comparativo de la biosorción de mercurio en macroalgas que forman florecimientos masivos en el sistema lagunar Santa María-La Reforma. ICMYL, UNAM. Tesis 71 pp.

Hendrickx, M.E., Brusca, R.C., Ramírez-Resendiz, G., (2002). Biodiversity of macrocrustaceans in the Gulf of California. In; Hendrickx, M.E., (Ed.), Contributions to the study of East Pacific Crustaceans. UNAM, Mexico, pp. 349-369.

Ho Y.B., (1990). *Ulva lactuca* as bioindicator of metal contamination in intertidal waters in Hong Kong. Hydrobiologia 203:73 –81.

Huerta-Díaz M.A. De Leon-Chavira F., Lares, M.L., Chee-Barragan, A., Siqueiros-Valencia, A. (2007). Iron, manganese and trace metal concentrations in seaweeds from the central west coast of the Gulf of California. Applied Geochemistry 22 (2007) 1380-1392.

INEGI (2010). Instituto Nacional de estadística, geografía e informática. Información estadística del estado de Sonora. Disponible en: <http://www.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/default.aspx?ent=26>

INEGI (2011). Instituto Nacional de estadística, geografía e informática. Información estadística de los Estados Unidos Mexicanos. Disponible en: <http://www.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/default.aspx>

Jackson, A.P., Alloway, B.J., (1991). The transfer of cadmium from sewage-sludge amended soils into the edible component of food crops. Water, Air and Soil Pollution 57-58:873-881.

Jara-Marini, M.E., Soto-Jiménez, M. F., Paéz-Osuna, F., (2008). Trace metals accumulation patterns in a mangrove lagoon ecosystem, Mazatlan Harbor; southeast Gulf of California. Journal of Environmental Science and Health, Part A, 43:9:995-1005.

Jara-Marini, M.E., Soto- Jiménez M. F., Paéz -Osuna, F., (2009). Trophic relationships and transference of Cd, Cu, Pb and Zn in a subtropical coastal lagoon food web from SE Gulf of California. Chemosphere 77 (10) 1366-1373.

Jensen, A. (1993). Present and future needs for algae and algal products. Hydrobiologia 260/261: 15-23

Karez C.S., Magalhaes V.F., Pfeiffer W.C., (1994). Trace metal accumulation by algae in Sepetiba Bay, Brazil. Environmental Pollution 83:351–356.

Keeney W.L., Breck W.G., Vanloon GW, Page J.A., (1976). The determination of trace metals in *Cladophora glomerata*- *C. Glomerata* as a potential biological monitor. Water Research 10:981 –984.

Kot, F.S., Green Ruiz, C., Paéz -Osuna, F., Shumilin, E., Rodriguez-Meza, D., (1999), Distribution of mercury in sediments from La Paz Lagoon, Peninsula of Baja California, Mexico: Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology 6, 45-51.

- Lares, L. M., Flores-Muñoz, G., Lara, R. (2002). Temporal variability of bioavailable Cd, Hg, Zn, Mn and Al in an upwelling regimen. *Environmental Pollution* 120:595–608
- Leal, F., Vasconcelos M.T, Sousa-Pinto, I., Cabrl J.P.S,(1997). Biomonitoring with benthic macroalgae and direct assay of heavy metals in seawater of the Oporto Coast (Northwest Portugal), *Marine Pollution*, vol. 34(12):1006-1015.
- Llorente-Mirandes, T. (2010). Measurement of arsenic compounds in litoral zone algae from the western Mediterranean Sea. Occurrence of arsenobetaine. *Chemosphere* 81:867-875
- Lobban CS., Harrison PJ, (1994). *Seaweed Ecology and Physiology*. Cambridge Univesity Press. Cambridge.
- Longoria –Espinoza, F.R. (2004), Variación estacional en la concentración de metales pesados en algas de la Bahía de Navachiste, Sinaloa. Tesis de Maestria. CIIDIR-Sinaloa, IPN. Pp. 59
- Maher W.A., (1986). Trace metal concentrations in marine organisms from St.Vincent Gulf, South Australia. *Water Air Soil Pollution* 29:77–84.
- Malea, P.S., Haritonidis, S. (1994). Bioaccumulation of metal by Rhodophyta species at antikyra Gulf Greece near an aluminium factory. *Botanica Marina* 37: 505-513.
- Malea, P., Haritonidis,S. (1999), Metal content in *Enteromorpha linza* (Linnaeus) in Thermaikos Gulf (Greece). *Hydrobiology* 394:103-112.
- Mata, Y.N., Torres, E., Blazquez, M.L., Ballester, A., Gonzalez, F., Muñoz, J.A., (2000). Gold (III) biosorption and bioreduction with the brown alga *Fucus vesiculosus*. *Journal of Hazardous Materials* 166:612-618.
- Miller, J.R., Hudson-Edwards, K.A., Lechler, P.J., Preston, D., Macklin, M.G., (2004). Heavy metal contamination of water, soil and produce within riverine communities or the Rio Pilcomayo basin, Bolivia. *Science of the Total Environment* 320, 189-209.
- Misheer, N., Kindness, A., Jonnalagadda, S.B., (2006). Seaweeds along KwaZulu Natal coast at South Africa. Elemental uptake by edible seaweed *Caulerpa racemosa* (seagrapes) and the arsenic speciation. *Journal of Environmental and Health. Part A* 41 (7):1217-1233.
- Morris, A. W., Bale, A. J., (1975). The concentration or cadmium, copper, manganese and zinc by *Fucus vesiculosus* in the Bristol Channel. *Estuarine, Coastal and Marine Sciencie* 3:153-63.
- Munda I.M., Hudnik V., (1991). Trace metal content in some seaweed from the Northern Adriatic. *Botanica Marina* 34:241 –249.
- Muse, J.O., Stripeikis, J.D., Fernandez F.M., d’Huicque L., Tudino M.B., Carducci, C.N., Troccoli, O.E., (1999). Seaweeds in the assessment of heavy metal pollution in the Gulf San Jorge, Argentina. *Environmental Pollution* 14:315–322.

Neushul, M. and Coon. D., (1971). Bibliography on the ecology and taxonomy of marine algae. In: (J.R. Rosowski and B.C. Parker, eds.) Selected paper in Phycology. Department of Botany, University of Nebraska Pp. 12-17

Ochoa-Izaguirre, M.J., Carballo, J.L., Páez-Osuna, F., (2002). Qualitative changes in macroalgal assemblages under two contrasting climatic conditions in a subtropical estuary. *Botanic Marine* 45 (2), pp. 130-138.

Ochoa-Izaguirre, M. J., Aguilar-Rosas, R., Aguilar-Rosas, L.E., (2007). Catálogo de Macroalgas de las lagunas costeras de Sinaloa. Serie Lagunas Costeras. Páez-Osuna, F. (Ed.). UNAM, ICMYL, México, pp.117

Olvera-Balderas, D., (2011). Cd, Hg y Pb en sitios mineros de Zacatecas: Concentración total y fraccionamiento geoquímico. Tesis de Maestría. Postgrado en Ciencias del Mar y Limnología. Universidad Nacional Autónoma de México. México.

Orduña-Rojas, J., R. M. Longoria-Espinoza. (2006). Metal content in *Ulva lactuca* (Linnaeus) from Navachiste Bay (Southeast Gulf of California) Sinaloa, Mexico .*Bulletin Environmental Contamination and Toxicology* 77:574–580

Ospina, A.N., Peña, E.J., (2003), Uso de algas benticas como indicadores de contaminación por metales pesados en la Bahía de Buenaventura-Pacífico Colombiano. Conferencia Internacional de usos múltiples del agua: Para la vida y el desarrollo sustentable.

Ouellette, T.R., (1981). Seasonal variation of trace-metals in the mussel *Mytilus californianus*. *Environmental Conservation* 8, 53–58.

Páez-Osuna, F., Ochoa-Izaguirre, M.J., Bojorquez-Leyva, H.I., Michel-Reynoso, L. (2000). Macroalgae as biomonitors of heavy metal availability in coastal lagoons from the subtropical Pacific of Mexico. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 64: 846-851.

Pérez-Escobedo, A., (2011). Composición elemental (C,N, P, Fe, Mn, Zn, Cu, Cd, Ni) de las macroalgas de seis lagunas costeras del estado de Sinaloa, México: estequiometría y variabilidad entre especies. ICMYL, UNAM. Tesis de maestría 83 pp.

Pérez-Reyes, C., (1997). Composición química de *Sargassum* spp. colectado en la Bahía de la Paz, B.C.S., y la factibilidad de su aprovechamiento en forma directa o como fuente de alginato. Tesis de maestría. La Paz, B.C.S., México, CICIMAR.

Prol-Ledesma, R. M., Canet, C., Torres-Vera, M.A., Forrest, M. J., Armienta, M. A., (2004), Vent fluid chemistry in Bahía Concepcion coastal submarine hydrothermal system, Baja California Sur, Mexico, *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 137:311-328.

Phillips, D.J.H., (1990). Use of macroalgae and invertebrates as monitors of metal levels in estuaries and coastal waters. In: Fuertes, R.W., Rainbow, P.S., (Eds.), *Heavy metals in the Marine Environment*. CRC, Boca Raton, FL, pp. 81-100.

Posada-Ayala, H.I., (2011). Geoquímica ambiental del distrito minero San Antonio, sedimentos de los arroyos de la cuenca de San Juan de los planos y plataforma continental de Bahía La Ventana, B.C.S., México. Tesis de maestría. IPN, CICIMAR.

Rai, L. C., Gaur, J. P. Kumar, H. D., (1981). Phycology and heavy-metal pollution. Biol. Rev. 56:99-151. Rainbow, P. S., y D. J. H. Phillips, 1993. Cosmopolitan biomonitors of trace metals. Marine Pollution Bulletin 26: 593-601.

Rainbow, P.S., Phillips, D.J.H., (1993). Cosmopolitan biomonitors of trace metals. Marine Pollution Bulletin 26:593-601.

Rajendran K, Sampathkumar P, Govindasamy C, Ganesan M, Kannan R, Kannan L, (1993). Levels of trace metals (Mn, Fe, Cu and Zn) in some Indian seaweeds. Marine Pollution Bulletin 26:283–285.

Rice, H.V., Leighty, D. A. and McLeod, G. C.,(1973). The effects of some trace metals on marine phytoplankton. CRC Critical reviews in microbiology 3:27-48.

Rodríguez-Figueroa, G. M., Shumilin, E., Sánchez-Rodríguez, I., (2009). Heavy metal pollution monitoring using the brown seaweed *Padina durvillaei* in the coastal zone of the Santa Rosalía mining región, Baja California Peninsula, Mexico. Journal Applied Phycology 21:19-26.

Sánchez-Rodríguez, I., Huerta-Díaz, M. A., Shoumilin, E., Holguín-Quinonez, O., Zertuche-González, J.A., (2001). Elemental concentrations in different species of seaweeds from Loreto Bay, Baja California Sur, Mexico: implications for the geochemical control of metals in algal tissues. Environmental Pollution 114, 145-160.

Santamaría-Del-Ángel, E., Álvarez-Borrego, S., Muller-Karger, F.E., (1994). Gulf of California biogeographic regions based on coastal zone color scanner imagery. Journal of Geophysical Research 99 (4):7411-7421.

Sawidis, T.H., Voulgaropoulos, A. N., (1986). Seasonal bioaccumulation of iron, cobalt and copper in marine algae from Thermaikos Gulf of the Northern Aegean Sea, Greece. Marine Environmental Research 19: 39-47.

Sawidis T., Brown, M.T., Zachariadis, G., Srtatis, I. (2001). Trace metal concentrations in marine macroalgae from different biotopes in the Aegean Sea. Environmental International (1)27:43–47.

Seeliger, U., Edwards, P., (1977). Correlation coefficients and concentration factors of copper and lead in seawater and benthic algae. Marine Pollution Bulletin 8:16-19.

Segovia –Zavala, J.A, Delgadillo-Hinojosa, F., Alvarez- Borrego, S. (1997). Cadmium in the coastal upwelling area adjacent to the California-Mexico border. Estuarine, Coastal and Shelf Science 46:475-481.

Serfor-Armah, Y., Nyarko, B. J. B., Osal, E.K., Carboo, D., Anim-Sampong, S., Seku, F. (2001) Rhodophyta seaweed species as bioindicators for monitoring toxic element

pollutants in the marine ecosystem of Ghana. *Water, Air and Soil Pollution* 127 (1-4):243-253

Shumilin, E., Páez-Osuna, F., Green-Ruiz, C., Sapozhnikov, D., (2001). Arsenic, antimony, selenium and other trace elements in sediments of the La Paz lagoon, Peninsula de Baja California, Mexico. *Marine Pollution Bulletin* 42:174-178

Sorrentino, C. (1979). The effects of heavy metals on phytoplankton – a review. *Phykos* 18:149-61.

Soto-Jiménez, M.F., Páez -Osuna, F., Morales-Hernandez, F., (2001). Selected trace metals in oysters (*Crassostrea iridescens*) and sediments from the discharge zone of the submarine sewage outfall in Mazatlan Bay (SE Gulf of California): chemical fractions and bioaccumulation factors. *Environmental Pollution* 114:357-370.

Soto-Jiménez, M.F., Páez -Osuna, F., Ruiz-Fernández, A.C., (2003). Nutrient cycling at the sediment-water interface and in sediments at Chiricahueto marsh: A subtropical ecosystem associated with agricultural land uses. *Water Research* 37:719-728.

Soto-Jiménez, Martin, F., Flegal, A. R., (2009). Origin of lead in the Gulf of California ecoregion using stable isotope analysis. *Journal of Geochemical Exploration* 101:209-217

Soto-Jiménez, M.F., Amezcua, F., González-Ledesma, R., 2010. Nonessential metals in striped marlin and Indo Pacific snappers in the Southeast Gulf of California, Mexico: Concentration and assessment of human health risk. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 58 (3):810-818.

Soto-Jiménez, M. F., Flegal, A.R., (2011). Childhood lead poisoning from the smelter in Torreon Mexico. *Environmental Research* 111:590-596.

Stephenson, M.D., Martin, M., Lange, S.E., Flegal, A.R., Martin, J.H., (1979). Trace metal concentrations in the California mussel *Mytilus californianus*. *California Mussel Watch 1977–1978. Vol. II. Water Quality Monitoring Report No. 79-22.*

Storelli, M. M., (2001). Heavy metals in the aquatic environment of the Southern Adriatic Sea, Italy: macroalgae, sediments and benthic species. *Environment International* 26 :505-509

Struck I, B. D., Pelzer, R., Ostapczuk, P., Emons, H., Mohl, C., (1997). Statistical evaluation of ecosystem properties influencing the uptake of As, Cd, Co, Cu, Hg, Mn, Ni, Pb and Zn in seaweed (*Fucus vesiculosus*) and common mussel (*Mytilus edulis*). *Science Total Environment* 207:29-42.

Talbot V, Chegwidan A., (1982). Cadmium and other heavy metal concentrations in selected biota from Cockburn Sound, Western Australia. *Freshwater Research* 33:779 – 788.

- Talukder, A.S.M.H.M., Meisner, C.A., Sarkar, M.A.R., Islam, M.S., (2010). Effect of water management, tillage options and phosphorus status on arsenic uptake in rice. *Ecology and Environmental Safety* 74:834-839.
- Thomson, D., Maher, W., Foster, S., (2007). Arsenic and selected elements in inter-tidal and estuarine marine algae, south-east coast, NSW, Australia. *Applied Organometal Chemistry* 21:396-411.
- Torres-Moye, G., Acosta-Ruiz, M.J., (1986). Some chemical properties indicating coastal upwelling events and subsurface countercurrent in an area near Punta Colonet, Baja California. *Ciencias Marinas* 12:10–25.
- Tukai, R., Maher, W.A., McNaught, I.J., Ellwood, Coleman, (2002), Occurrence and chemical form of arsenic in marine macroalgae from the east coast of Australia. *Marine and freshwater research* 53:971-980.
- Van Assche, F., Clijsters, H., (1990). Effects of metals on enzyme activity in plants. *Plant Cell Environmental* 13:195-206.
- Van Geen, A., Husby, D.M., (1996). Cadmium in the California current system: tracer of past and present upwelling. *Journal of Geophysical Research* 101:389-3507.
- Van Geen, A., Luoma, S.N., Fuller, C.C., Anima, R., Clifton, H.E., Tumbore, S., (1992). Evidence from Cd/Ca ratios in foraminifera for greater upwelling off California 4000 years ago. *Nature* 358:54-56.
- Vasconcelos, M.T.S.D., Leal, M.F.C., (2001). Seasonal variability in the kinetics of Cu, Pb, Cd and Hg accumulation by macroalgae. *Marine Chemistry* 74(1):65-85.
- Viana, I. G., Aboal, J.R., Fernández, J.A., Real, C., Villares, R., Carballeira, A. (2010). Use of macroalgae stored in an environmental specimen bank for application of some European framework directives. *Water research* 44:1713–1724.
- Villares, R., Puente, X., Carballeira, A., (2002). Seasonal variation and background levels of heavy metals in two green seaweeds. *Environmental Pollution* 119:79-90.
- Villares, R., Puente, X., Carballeira, A., (2001). *Ulva* and *Enteromorpha* as indicators of heavy metal pollution. *Hydrobiologia* 462:221-232.
- Von Damm, K.L., Edmond, J.M., Grant, B., Measures, C.I., (1985). Chemistry of submarine hydrothermal solutions at 21°N, East Pacific Rise, *Geochimica et Cosmochimica Acta* 49:2197-2220.
- Wood, J.M. (1974). Biological cycles for toxic elements in the environment. *Science* 183:1049-52.
- WWF. (2006). Estableciendo prioridades de conservación en islas del Golfo de California: Un ejercicio con criterios múltiples. (Reporte integrado por J.A. Rodríguez Valencia, D. Crespo Camacho y M.A. Cisneros-Mata). 31 p.

Yamashita, M., Tomita-Yokotani, K., Hashimoto, H., Sawaki, N., Notoya, M., (2009). Sodium and potassium uptake of *Ulva*-application of marine macroalgae for space agriculture. *Advances in Space Research* 43:1220-1223.

12. Anexos

Anexo 1. Concentración promedio ($\mu\text{g g}^{-1}$ en peso seco) de Hg, Cd y As en macroalgas de diferentes zonas geográficas.

Especie	Localidad	Cd $\mu\text{g g}^{-1}$	Hg $\mu\text{g g}^{-1}$	As $\mu\text{g g}^{-1}$	Referencia
<i>Macrocystis poriferya</i>	San Quintin, BC	11.3-3.9	ND		Lares, et al (2002)
<i>Caulerpa racemosa</i>	Golfo de Aden, Yemen	0.9			Shwafi & Rushdi (2008)
<i>Ulva clathrata</i>		8.1			Mohammad et al.(1985)
<i>P. boryana</i>		0.6			Shwafi & Rushdi (2008)
<i>G. foliiferer</i>		0.5			Shwafi & Rushdi (2008)
<i>L. obtusa</i>	Costa de Aqaba	2.4			Mohammad et al.(1985)
<i>S. dentifolium</i>		8.2			Mohammad et al.(1985)
<i>Cladophora polifera</i>	Espana, Oeste del Mediterraneo			13.9	Llorente-Mirandes et al. (2010)
<i>Enteromorpha compressa</i>				6.2	Llorente-Mirandes et al. (2010)
<i>Ulva rigida</i>				5.3	Llorente-Mirandes et al. (2010)
<i>Codium effusum</i>				20.4	Llorente-Mirandes et al. (2010)
<i>Codium vermilara</i>				27.0-36.2	Llorente-Mirandes et al. (2010)
<i>Halopteris scoparia</i>				9.1-11.5	Llorente-Mirandes et al. (2010)
<i>Halopteris filicina</i>				9.4	Llorente-Mirandes et al. (2010)
<i>Cystoseira mediterranea</i>				39	Llorente-Mirandes et al. (2010)
<i>Alsidium corallinum</i>				11	Llorente-Mirandes et al. (2010)
<i>Jania rubens</i>				2	Llorente-Mirandes et al. (2010)
<i>Himantothallus grandifolius</i>	Potter Cove, King George Island			152±33	Farias, et al., (2007)
<i>Phaeurus antarcticus</i>				88±20	Farias, et al., (2007)
<i>Adenocystis utricularis</i>				40±4	Farias, et al., (2007)
<i>Ascoseira mirabilis</i>				52±7	Farias, et al., (2007)
<i>Desmarestia antarctica</i>				62±7	Farias, et al., (2007)
<i>Desmarestia anceps</i>				33±5	Farias, et al., (2007)
<i>Iridaea cordata</i>				28±6	Farias, et al., (2007)
<i>Myriogramme sp.</i>				6±3	Farias, et al., (2007)

<i>Palmaria decipiens</i>				11±4	Farias, et al., (2007)
<i>Enteromorpha</i> sp.	Costas de Oporto, Portugal	0.92	0.121		Leal, et al (1997)
<i>Porphyra</i> sp.		0.796	0.133		Leal, et al (1997)
<i>Ulva rigida</i>	Lago de Venecia	0.2 ± 0.0		7± 3	Caliceti (2001)
<i>Gracilaria gracilis</i>		0.4 ± 0.2		15± 10	Caliceti (2001)
<i>Porphyra leucosticta</i>		0.1 ±0.0		13± 13	Caliceti (2001)
<i>Grateloupia doryphora</i>		0.2 ± 0.0		31 ±28	Caliceti (2001)
<i>Undaria pinnatifida</i>		0.1 ± 0.0		70 ± 33	Caliceti (2001)
<i>Fucus virsoides</i>		0.6 ±0.3		40 ±45	Caliceti (2001)
<i>Cystoseira barbata</i>		0.1± 0.0		242 ±104	Caliceti (2001)
<i>Ulva</i> sp.	Moreton Bay, Australia	0.22–0.77		0.87–2.53 5.43–	Gosavi (2003)
<i>Enteromorpha</i> sp.		0.36–1.11		10.73	Gosavi (2003)
<i>Cladophora</i> sp.		0.83–2.40		3.06–3.94	Gosavi (2003)
<i>Chaetomorpha</i> sp.		0.24–0.42		3.26–3.74	Gosavi (2003)
<i>Ulva</i> sp.	Northern Adriatic, Croatia	0.1–0.9			Munda IM, (1991)
<i>Enteromorpha</i> sp.		0.1–0.9			Munda IM, (1991)
<i>Cladophora</i> sp.		0.3			Munda IM, (1991)
<i>Ulva</i> sp.	Coastal waters of Hong Kong	0.750±0.03			Ho (1990)
<i>Enteromorpha</i> sp.		0.6-0.12			Ho (1990)
<i>Chaetomorpha</i> sp.		0.4–0.6			Ho (1990)
<i>Ulva</i> sp.	Thermaikos Gulf, Greece	0.1–2.5			Haritonidis &, Malea (11990)
<i>Enteromorpha</i> sp.		0.1–2.5			Haritonidis &, Malea (11990)
<i>Ulva</i> sp.	Aegean sea, Greece	0.24–1.1			Sawidis T, et al (2001)
<i>Enteromorpha</i> sp.		0.47–0.77			Sawidis T, et al (2001)
<i>Cladophora</i> sp.		0.32–1.0			Sawidis T, et al (2001)
<i>Ulva</i> sp.	Bosphorus, Turkey	1.41±0.29			Gueven KC,et al (1993)
<i>Enteromorpha</i> sp.		2.50±0.53			Gueven KC,et al (1993)
<i>Ulva</i> sp.	Gulf San Jorge, Argentina	0.550±0.04			Muse JO, et al (1999)
<i>Enteromorpha</i> sp.		0.70±0.07			Muse JO, et al (1999)
<i>Ulva</i> sp.	Black sea, N.T turkey	2.12±0.47		6.4 ±3.2	Gueven KC,et al (1992)

<i>Chaetomorpha</i> sp.		2.33±0.52		5.6 ±2.6	Gueven KC,et al (1992)
<i>Ulva</i> sp.	Sepetida Bay, Brazil	0.4±0.02			Karez CS, et al(1994)
<i>Ulva</i> sp.	Cockburn Sound, Australia	0.2–1.6			Talbot V,et al (1982)
<i>Ulva</i> sp.	St.V incent Gulf, Australia	0.4±0.02			Maher WA(1986)
<i>Enteromorpha</i> sp.	Batu Ferringhi, Malaysia	16.32			Rajendran K (1993)
<i>Cladophora</i> sp.		9.25			Rajendran K (1993)
<i>Cladophora</i> sp.	Oresund area, Sweden	0.85-4.55			Hagerhall B (1973)
<i>Cladophora</i> sp.	Deadman Bay, Ontario	3.9±1.0			Keeney WL, et al., (1976)
<i>U. lactuca</i>	Southern Adriatic Sea (Italy)	0.20±0.23	0.12±0.05		Storelli, et al., (2001)
<i>C. vemilara</i>		0.19±0.07	0.13±0.10		Storelli, et al., (2001)
<i>E. prolifera</i>		0.72±0.36	0.15±0.12		Storelli, et al., (2001)
<i>Fucus vesiculosos</i> (2001)	Costas de Galicia, Portugal	1.20±0.34	0.0306±0.0194		Viana, et al., (2009)
<i>Fucus vesiculosos</i> (2003)		1.19±0.34	0.023±0.013		Viana, et al., (2009)
<i>Fucus vesiculosos</i> (2005)		0.666±0.48	0.02±0.012		Viana, et al., (2009)
<i>Fucus vesiculosos</i> (2007)		0.588±1.05	0.022±0.019		Viana, et al., (2009)
<i>Fucus seranoides</i> (2001)		1.74±0.56	0.024±0.015		Viana, et al., (2009)
<i>Fucus seranoides</i> (2001)		1.23±0.27	0.027±0.018		Viana, et al., (2009)
<i>Fucus seranoides</i> (2001)		0.43±0.23	0.02±0.007		Viana, et al., (2009)
<i>Fucus seranoides</i> (2001)		0.19±0.07	0.02±0.007		Viana, et al., (2009)
<i>Cystoseira</i> sp.	Çanakkale/City, Turkey	0.090±0.009	0.0124±0.016		Akcali & Kucuksezgin (2011)
<i>Ulva</i> sp.		0.0542±0.14	0.053±0.003		Akcali & Kucuksezgin (2011)
<i>Cystoseira</i> sp.	Çanakkale/Dardanos, Turkey	0.278±0.049	0.054±0.002		Akcali & Kucuksezgin (2011)
<i>Ulva</i> sp.		0.057±0.016	0.108±0.018		Akcali & Kucuksezgin (2011)
<i>Enterophmorpha</i> sp.		0.044±0.008	0.089±0.002		Akcali & Kucuksezgin (2011)
<i>Cystoseira</i> sp.	Izmir/Foça, Turkey	0.018±0.006	0.057±0.010		Akcali & Kucuksezgin (2011)
<i>Ulva</i> sp.		0.015±0.002	0.048±0.012		Akcali & Kucuksezgin (2011)
<i>Enterophmorpha</i> sp.		0.013±0.003	0.090±0.015		Akcali & Kucuksezgin (2011)
<i>Padina pavonica</i>		0.104±0.008	0.047±0.006		Akcali & Kucuksezgin (2011)
<i>Caulerpa racemosa</i>		0.022±0.003	0.104±0.018		Akcali & Kucuksezgin (2011)
<i>Codium fragile</i>		0.015±0.0007	0.026±0.0002		Akcali & Kucuksezgin (2011)

<i>Ulva</i> sp.	Izmir/Bostanli, Turkey	0.019±0.002	0.060±0.014		Akcali & Kucuksezgin (2011)	
<i>Enterophmorpha</i> sp.		0.030±0.002	0.081±0.0007		Akcali & Kucuksezgin (2011)	
<i>Gracilaria gracilis</i>		0.011±0.002	0.094±0.014		Akcali & Kucuksezgin (2011)	
<i>Ulva</i> sp.	Izmir/Narlidere, Turkey	0.022±0.006	0.199±0.062		Akcali & Kucuksezgin (2011)	
<i>Enterophmorpha</i> sp.		0.021±0.008	0.336±0.13		Akcali & Kucuksezgin (2011)	
<i>Codium fragile</i>		0.033±0.001	0.055±0.008		Akcali & Kucuksezgin (2011)	
<i>Gracilaria gracilis</i>		0.069±0.0005	0.223±0.002		Akcali & Kucuksezgin (2011)	
<i>Cystoseira</i> sp.	Izmir/Urla, Turkey	0.312±0.032	0.076±0.006		Akcali & Kucuksezgin (2011)	
<i>Ulva</i> sp.		0.025±0.008	0.073±0.013		Akcali & Kucuksezgin (2011)	
<i>Enterophmorpha</i> sp.		0.043±0.0007	0.068±0.002		Akcali & Kucuksezgin (2011)	
<i>Padina pavonica</i>		0.018±0.017	0.044±0.003		Akcali & Kucuksezgin (2011)	
<i>Cystoseira</i> sp.	Marmaris/Turunç, Turkey	0.107±0.01	0.088±0.015		Akcali & Kucuksezgin (2011)	
<i>Padina pavonica</i>		0.148±0.012	0.043±0.005		Akcali & Kucuksezgin (2011)	
<i>Cystoseira</i> sp.	Marmaris/_İçmeler, Turkey	0.273±0.053	0.085±0.011		Akcali & Kucuksezgin (2011)	
<i>Centroceras clavulatum</i>	Coast of Ghana	6.52	0.09	0.22	0.009	Y. Serfor-Armah, et al (2000)
<i>Polycavernosa dentata</i>				0.10	0.008	Y. Serfor-Armah, et al (2000)
<i>Gigartina acicularis</i>				0.058	0.006	Y. Serfor-Armah, et al (2000)
<i>Hypnea musciformis</i>				0.11	0.007	Y. Serfor-Armah, et al (2000)
<i>U. lactuca</i>	Punta Descanso, BCS	0.7		ND	ND	De la Lanza, et al (1989)
<i>Mezcla de algas</i>		0.5		ND	0.8	De la Lanza, et al (1989)
<i>A. utricularis</i>	Estrecho de Magallanes, Chile			ND		Astorga-Espana, et al (2007)
<i>Enteromorpha</i> sp.				ND-0.02		Astorga-Espana, et al (2007)
<i>M. laminarioides</i>				ND		Astorga-Espana, et al (2007)
<i>P. columbina</i>				ND		Astorga-Espana, et al (2007)
<i>Bostrychia calliptera</i>	Bahia de Buenaventura, Colombia			0.05-0.198		Ospina, et al., (2003)
<i>Rhizoclonium riporium</i>				0 - 0.181		Ospina, et al., (2003)
<i>Fucus vesiculosus</i>	Tagus estuario, Portugal			0.71		Ferreira, et al (1991)
<i>Ulva lactuca</i>				0.5		Ferreira, et al (1991)
<i>G. verrucosa</i>				0.96		Ferreira, et al (1991)
<i>F. vesiculosus</i>				0.3		Ferreira, et al (1991)

<i>U. lactuca</i>		0.58		Ferreira, et al (1991)
<i>U. lactuca</i>		2.2		Ferreira, et al (1991)
<i>G. verrucosa</i>		4.68		Ferreira, et al (1991)
<i>Caulerpa racemosa</i>	KwaZulu, Sudafrica	0.189->0.205	8.850±0.2	Misheer, et al (2006)
<i>Corallina officinalis</i>	Costa sureste, Australia		4.3	Thomson, et al (2007)
<i>Martensia fragilis</i>			11.3	Thomson, et al (2007)
<i>Laurencia obtusa</i>			20.8	Thomson, et al (2007)
<i>Laurencia sp.</i>			24.7	Thomson, et al (2007)
<i>Delisea pulchra</i>			31.7	Thomson, et al (2007)
<i>Ulva rigida</i>			8.7	Thomson, et al (2007)
<i>Caulerpa flexilis</i>			10	Thomson, et al (2007)
<i>Cladophoropsis herpestica</i>			10.4	Thomson, et al (2007)
<i>Caulerpa cactoides</i>			8.9	Thomson, et al (2007)
<i>Rhizoclonium implexum</i>			11	Thomson, et al (2007)
<i>Cladophora subsimplex</i>			8	Thomson, et al (2007)
Feofitas	Australia		5-173	Tukai, et al (2002)
Clorofitas			0.12-30.2	Tukai, et al (2002)
Rodofitas			0.11-16.9	Tukai, et al (2002)
Feofitas	India		8.0-68	Odhandhukia et al (1969)
Clorofitas			0.1-6.3	Odhandhukia et al (1969)
Rodofitas			0-5	Odhandhukia et al (1969)
Feofitas	Noruega		15-109	Lunde (1970)
Rodofitas			10.0-13	Lunde (1970)
Feofitas	Reino Unido		26-47	Leatherland et al (1974)
Rodofitas			11.0-39	Leatherland et al (1974)
Feofitas	Japon		<1-230	Tagawa et al (1976)
Clorofitas			<1-8	Tagawa et al (1976)
Rodofitas			<1-12	Tagawa et al (1976)
Feofitas	USA		1.1-3.16	Sanders, (1979)
Clorofitas			0.2-23.3	Sanders, (1979)

Rodofitas		0.4-8.2	Sanders, (1979)
Feofitas	British Columbia	40.8-92.4	Whyte et al (1983)
Feofitas	Australia	21.3-179	Maher et al (1984)
Rodofitas		12.5-31.3	Maher et al (1984)
Clorofitas		6.3-16.3	Maher et al (1984)
Feofitas	Goa	4.5-20.9	Ansell, et al (1979)
<i>Sargassum vulgare</i>	Brazilian	58.8±1.7	Mirlean, et al (2011)
<i>Sargassum ramifolium</i>		66.3±1.4	Mirlean, et al (2011)
<i>Dyctiopteris polypodiodes</i>		15.8±0.9	Mirlean, et al (2011)
<i>Corallina panizzo</i>		2.4±0.1	Mirlean, et al (2011)

Anexo 2. Concentración promedio ($\mu\text{g g}^{-1}$ en peso seco) de Hg, Cd y As en macroalgas de diferentes puntos del golfo de California.

Especie	Localidad	Cd $\mu\text{g g}^{-1}$	Hg $\mu\text{g g}^{-1}$	As $\mu\text{g g}^{-1}$	Referencia
<i>Bostrychia radicans</i>	Estero de Urias, Mazatlan, Sin	0.1			Pérez-Escobedo (2011)
<i>Colpomenia ramosa</i>	Ohuira, Sin.	9.0±0.9			Pérez-Escobedo (2011)
<i>Caulerpa sertulariodes</i>	Altata, Sin.	0.4-0.5			Pérez-Escobedo (2011)
<i>Caulerpa sertulariodes</i>	Estero de Urias, Mazatlan, Sin	0.1-0.4			Pérez-Escobedo (2011)
<i>Caulerpa sertulariodes</i>	Santa Ma. La Reforma, Sin	0.4-0.9			Pérez-Escobedo (2011)
<i>Caulerpa sertulariodes</i>	Navachiste, Sin	0.7-1.9			Pérez-Escobedo (2011)
<i>Caulerpa sertulariodes</i>	Ohuira, Sin.	0.4-1.6			Pérez-Escobedo (2011)
<i>Caulerpa sertulariodes</i>	Estero de Urias, Mazatlan, Sin	0.1-0.19	0.021-0.029		Jara-Marini (2008)
<i>Caulerpa sertulariodes</i>	La Paz, BCS			5.0-21.0	Rodríguez-Castañeda(2006)
<i>Caulerpa sertulariodes</i>	Santa Ma. La Reforma, Sin	0.2			Hernández Tovalin (2009)
<i>Caulerpa tuberculata</i>	Ohuira, Sin.	2.1±0.			Pérez-Escobedo (2011)
<i>Chaetomorpha linus</i>	Estero de Urias, Mazatlan, Sin	0.12-0.14	0.043-0.068		Jara-Marini (2008)
<i>Codium amplivesiculatum</i>	Navachiste, Sin	0.5-1.7			Pérez-Escobedo (2011)
<i>Codium ampliviseculatum</i>	Puerto de Guaymas, Son.	1.9			Páez Osuna (2000)
<i>Codium ampliviseculatum</i>	Puerto de Guaymas, Son.		0.099±0.006		Green-Ruiz (2005)
<i>Codium ampliviseculatum</i>	Ohuira, Sin.	2.2			Páez Osuna (2000)
<i>Codium cuneatum</i>	Bahia de Loreto, BCS			17.9-41.4	Sánchez-Rodríguez (2000)
<i>Codium cuneatum</i>	La Paz, BCS			31-48	Rodríguez-Castañeda(2006)
	Monteon/Pto				
<i>Codium isabelae</i>	Vallarta/Manzanillo	1.7			Páez Osuna (2000)
<i>Codium leprieurii</i>	Ohuira, Sin.	0.3±0.1			Pérez-Escobedo (2011)
<i>Codium simulans</i>	Navachiste, Sin	1.6±0.3			Pérez-Escobedo (2011)
<i>Colpomenia tuberculata</i>	Navachiste, Sin	2.8±0.1			Pérez-Escobedo (2011)
<i>Digenia divaricata</i>	La Paz, BCS			28-33	Rodríguez-Castañeda(2006)
<i>Digenia simplex</i>	La Paz, BCS			28	Rodríguez-Castañeda(2006)
<i>Dyctiota dichotoma</i>	Altata, Sin.	0.5			Pérez-Escobedo (2011)
<i>Dyctiota dichotoma</i>	Estero de Urias, Mazatlan, Sin	0.1			Pérez-Escobedo (2011)

<i>Dyctiota dichotoma</i>	Santa Ma. La Reforma, Sin	1.5-3.3			Pérez-Escobedo (2011)
<i>Enteromorpha Clathrata</i>	Puerto de Guaymas, Son.	1.4			Páez Osuna (2000)
<i>Enteromorpha Clathrata</i>	Puerto de Guaymas, Son.		0.134±0.039		Green-Ruiz (2005)
<i>Enteromorpha Clathrata</i>	Yavaros, Son.	0.7			Páez Osuna (2000)
<i>Enteromorpha Clathrata</i>	Ohuira, Sin. Monteon/Pto	1.6			Páez Osuna (2000)
<i>Enteromorpha flexuosa</i>	Vallarta/Manzanillo	1			Páez Osuna (2000)
<i>Enteromorpha intestinalis</i>	Mazatlan, Sin.	0.3			Páez Osuna (2000)
<i>Enteromorpha intestinalis</i>	La Paz, BCS			3.0-16.0	Rodríguez-Castañeda(2006)
<i>Enteromorpha Linza</i>	Ohuira, Sin.	1.4			Páez Osuna (2000)
<i>Enteromorpha Linza</i>	Altata, Sin.	1.4			Páez Osuna (2000)
<i>Gracilaria crispata</i>	Navachiste, Sin	1.1±0.8			Pérez-Escobedo (2011)
<i>Gracilaria pinnata</i>	Navachiste, Sin	3.4			Longoria Espinoza (2004)
<i>Gracilaria crispata</i>	Estero de Urias, Mazatlan, Sin	0.15-0.23	0.012-0.031		Jara-Marini (2008)
<i>Gracilaria pachidermica</i>	Bahia de Loreto, BCS			13.8	Sánchez-Rodríguez (2000)
<i>Gracilaria sp.</i>	Altata, Sin.	0.2			Ruelas Inzunza- Páez Osuna(2006)
<i>Gracilaria sp.</i>	Estero de Urias, Mazatlan, Sin	0.2			Jara Marini et al. (2009)
<i>Gracilaria subsecundata</i>	Puerto de Guaymas, Son.		0.095±0.03		Green-Ruiz (2005)
<i>Gracilaria subsecundata</i>	Ceuta, Sin	1.6			Páez Osuna (2000)
<i>Gracilaria tenuis</i>	La Paz, BCS			3.0-14.0	Rodríguez-Castañeda(2006)
<i>Gracilaria turgida</i>	Estero de Urias, Mazatlan, Sin	0.27	0.016		Jara-Marini (2008)
<i>Gracilaria vermiculophylla</i>	Ohuira, Sin.	0.5-1.6			Pérez-Escobedo (2011)
<i>Gracilaria vermiculophylla</i>	Altata, Sin.	0.4-1.1			Pérez-Escobedo (2011)
<i>Gracilaria vermiculophylla</i>	Estero de Urias, Mazatlan, Sin	0.1-0.4			Pérez-Escobedo (2011)
<i>Gracilaria vermiculophylla</i>	Santa Ma. La Reforma, Sin	1.1-3.3			Pérez-Escobedo (2011)
<i>Gracilaria vermiculophylla</i>	Navachiste, Sin	2.4-0.7			Pérez-Escobedo (2011)
<i>Gracilaria vermiculophylla</i>	El Colorado, Sin.	1.4-4.5			Pérez-Escobedo (2011)
<i>Gracilaria vermiculophylla</i>	Estero de Urias, Mazatlan, Sin	0.1-0.19	0.032-0.041		Jara-Marini (2008)
<i>Gracilaria vermiculophylla</i>	Estero de Urias, Mazatlan, Sin	0.25			Pérez-Escobedo (2011)
<i>Gracilaria vermiculophylla</i>	Santa Ma. La Reforma, Sin	0.7			Hernández Tovalín (2009)

<i>Halymeda discoidea</i>	La Paz, BCS		9.0-18.0	Rodríguez-Castañeda(2006)
<i>Hypnea pannosa</i>	Bahia de Loreto,BCS		5.45	Sánchez-Rodríguez (2000)
<i>Hypnea valentiae</i>	Navachiste, Sin	1.3-2.0		Pérez-Escobedo (2011)
<i>Ishige sinicola</i>	Navachiste, Sin	5.2±0.7		Pérez-Escobedo (2011)
<i>Laurencia jhnstonii</i>	Bahia de Loreto,BCS		5.65	Sánchez-Rodríguez (2000)
<i>Laurencia papillosa</i>	Navachiste, Sin	1.7±0.1		Pérez-Escobedo (2011)
<i>Laurencia papillosa</i>	Bahia de Loreto,BCS		1.48	Sánchez-Rodríguez (2000)
<i>Padina durvillae</i>	Navachiste, Sin	7.2-9.1		Pérez-Escobedo (2011)
	Monteon/Pto			
<i>Padina durvillae</i>	Vallarta/Manzanillo	5.6		Páez Osuna (2000)
<i>Padina durvillae</i>	Bahia de Loreto,BCS		2.66-11.3	Sánchez-Rodríguez (2000)
<i>Padina durvillae</i>	Santa Rosalia, BCS	3.6±1.6		Rodríguez-Figueroa(2008)
<i>Padina mexicana</i>	La Paz, BCS		17.0-20.0	Rodríguez-Castañeda(2006)
<i>Sargassum sinicola</i>	Navachiste, Sin	6.0±0.3		Pérez-Escobedo (2011)
<i>Sargassum sinicola</i>	Ohuira, Sin.	2.4±0.2		Pérez-Escobedo (2011)
<i>Sargassum sinicola</i>	Bahia de Loreto,BCS		7.55-13.4	Sánchez-Rodríguez (2000)
<i>Sargassum sinicola</i>	La Paz, BCS		45.0-77.0	Rodríguez-Castañeda(2006)
<i>Spyridia filamentosa</i>	Altata, Sin.	7.4±0.6		Pérez-Escobedo (2011)
<i>Spyridia filamentosa</i>	Santa Ma. La Reforma,Sin	0.47-7.7		Pérez-Escobedo (2011)
<i>Spyridia filamentosa</i>	Navachiste, Sin	7.1-1.41		Pérez-Escobedo (2011)
<i>Spyridia filamentosa</i>	Altata, Sin.	3.7		Páez Osuna (2000)
<i>Spyridia filamentosa</i>	La Paz, BCS		3.0-6.0	Rodríguez-Castañeda(2006)
<i>Ulva compressa</i>	Altata, Sin.	0.3-3.2		Pérez-Escobedo (2011)
<i>Ulva compressa</i>	Santa Ma. La Reforma,Sin	1		Pérez-Escobedo (2011)
<i>Ulva fasciata</i>	Santa Ma. La Reforma,Sin	1.5±0.4		Pérez-Escobedo (2011)
<i>Ulva intestinalis</i>	Ohuira, Sin.	0.4-0.9		Pérez-Escobedo (2011)
<i>Ulva intestinalis</i>	Estero de Urias, Mazatlan, Sin	0.12	0.039	Jara-Marini (2008)
<i>Ulva lactuca</i>	Estero de Urias, Mazatlan, Sin	0.1		Pérez-Escobedo (2011)
<i>Ulva lactuca</i>	Santa Ma. La Reforma,Sin	0.7-1.0		Pérez-Escobedo (2011)
<i>Ulva lactuca</i>	Puerto de Guaymas, Son.		0.058±0.029	Green-Ruiz (2005)
<i>Ulva lactuca</i>	Yavaros, Son.	0.9		Páez Osuna (2000)

<i>Ulva lactuca</i>	Altata, Sin.	1.3-2.6		Orduna Ruela, et al (2006)
<i>Ulva lactuca</i>	Mazatlan, Sin. Monteon/Pto	0.2		Páez Osuna (2000)
<i>Ulva lactuca</i>	Vallarta/Manzanillo	1.3		Páez Osuna (2000)
<i>Ulva lactuca</i>	Estero de Urias, Mazatlan, Sin	0.14	0.026	Jara-Marini (2008)
<i>Ulva linza</i>	Navachiste, Sin	2.6		Pérez-Escobedo (2011)
<i>Ulva lobata</i>	Estero de Urias, Mazatlan, Sin	0.42	0.042	Jara-Marini (2008)
<i>Ulva prolifera</i>	Navachiste, Sin	1		Pémrez-Escobedo (2011)

Anexo 3. Ubicación por estaciones de las diferentes especies recolectadas en las regiones del Golfo de California.

CLOROPHYTA					
GENERO	ESPECIE	R1	R2	R3	R4
<i>Caulerpa</i>	<i>Caulerpa cupressioides</i>				92
	<i>Caulerpa sertularioides</i>				157
	<i>Caulerpa</i> sp.				155
<i>Chaetomorpha</i>	<i>Chaetomorpha</i> sp.				97
	<i>Chaetomorpha anntenina</i>				96, 94, 92
	<i>Chaetomorpha linum</i>				93
<i>Cladophora</i>	<i>Cladophora</i> sp.			91, 82	96
	<i>Cladophora microcladioides</i>				92
	<i>Cladophora albida</i>		129		136
	<i>Cladophora columbiana</i>		126		
<i>Codium</i>	<i>Codium amplivesiculatum</i>	120, 105		77	43, 41, 46, 156
	<i>Codium simulans</i>	115		87, 74, 77	133, 156.
	<i>Codium brandegeei</i>	117		79	132
	<i>Codium</i> sp.	123, 111		82, 87, 75- B	156
	<i>Codium fragile</i>	109, 108		81, 83	
<i>Colpomenia</i>	<i>Colpomenia textori</i>			87	
<i>Rhizoclonium</i>	<i>Rhizoclonium</i> sp.				18, 157
	<i>Rhizoclonium implexum</i>				26
<i>Ulva</i>	<i>Ulva compressa</i>		126	75	155, 46, 160
	<i>Ulva expansa</i>				155
	<i>Ulva intestinalis</i>	122		68, 77, 76, 79, 80	155, 92, 31, 2 159, 43-B
	<i>Ulva lactuca</i>	122, 117	130	65, 54, 77, 81, 82, 74, 83, 53, 75-B, 56, 90	155, 95, 94, 157, 41, , 8, 133, 31

	<i>Ulva lobata</i>			74	155, 97
	<i>Ulva sp</i>	105		72, 90	96, 95,43
	<i>Ulva flexosa</i>			54, 77, 83, 79	92, 136, 41, 94, 95, 157, 43-B
	<i>Ulva clathrata</i>			75	134, 46, 41,31, 36
	<i>Ulva prolifera</i>		130	63,85	
	<i>Ulva linza</i>	124	130, 129	57	
	<i>Ulva acantophora</i>	116, 114, 111, 110, 109, 107, 105		81, 54, 61, 82, 57, 83, 79, 91 87, 55, 53, 75-B,74, 77	
	<i>Ulva rigida</i>	116			
	<i>Ulva fasciata</i>			87	96
	<i>Ulva taeniata</i>			77	
<i>Valoniopsis</i>	<i>Valoniopsis pachynema</i>		126		

PHAEOPHYTA

<i>Colpomenia</i>	<i>Colpomenia sp.</i>				97, 95, 94, 43-B
	<i>Colpomenia tuberculata</i>	119, 118, 117, 116, 115, 114		87, 85, 54, 80, 83, 75, 65, 60, 81, 91, 76 79,84, 55, 86, 86-B, 82, 75-B, 77, 84, 90, 72	96, 92, 135, 134, 133, 131, 95, 94, 97, 156
	<i>Colpomenia sinuosa</i>	116, 115, 114, 41, 105		75	132
	<i>Colpomenia sp.</i>	123, 121, 120, 109	128	82, 83, 85	159,156
	<i>Colpomenia phaeodactula</i>	117			
	<i>Colpomenia grobosa</i>	105			
	<i>Colpomenia peregrina</i>			79	
	<i>Colpomenia ramosa</i>			63, 72	97, 159
<i>Cutleria</i>	<i>Cutleria hancockii</i>		131		
<i>Dictyota</i>	<i>Dictyota sp.</i>	123, 121		83, 75-B, 160,	155, 94, 95, 157, 96, 159

	<i>Dictyota divaricata</i>		117		87		132
	<i>Dictyota dichotoma</i>			131		86	
<i>Ectocarpus</i>	<i>Ectocarpus</i> sp.						155
<i>Endarachne</i>	<i>Endarachne</i> sp.		111				
<i>Hydroclathrus</i>	<i>Hydroclathrus clathratus</i>				57, 56, 74, 84, 85, 90		
<i>Ishige</i>	<i>Ishige foliacea</i>						132
	<i>Ishige simulans</i>						156
<i>Pachydictyon</i>	<i>Pachydictyon coriasum</i>			131			
				131,			
<i>Padina</i>	<i>Padina durvillae</i>	118, 116, 115, 114, 112		126	54, 79, 60, 81, 87,	96, 92, 165, 133, 97, 95	
					82, 75-B, 77, 74, 90, 72		
	<i>Padina</i> sp.	123, 119, 109			90, 54, 82, 83		95
	<i>Padina crispata</i>		117				
	<i>Padina caulernses</i>					81	
<i>Rosenvingea</i>	<i>Rosenvingea</i> sp.		117				134
	<i>Rosenvingea intricata</i>					86-B, 90	
<i>Sargassum</i>	<i>Sargassum sinicola</i>	118, 117, 116, 113			82, 75, 79, 80, 91, 53, 86-B, 57,	31, 41, 133, 156	
					75-B, 85, 56, 74, 77, 84, 73, 90		
	<i>Sargassum horridum</i>	115, 114, 107		126		54, 87	31, 132
				131,			
	<i>Sargassum</i> sp.	123, 119, 114, 111, 109		128	54, 74, 80, 81, 76,	36, 43-B, 43, 135, 134, 159	
					82, 83, 79, 84, 55, 86, 85		
	<i>Sargassum johnstonii</i>	118, 117, 115, 113, 107, 105		131			132
	<i>Sargassum herporhizum</i>		116, 106				
	<i>Sargassum muticum</i>					73, 90	
	<i>Sargassum liebmannii</i>						96
	<i>Sargassum lapazeaum</i>						133
	<i>Sargassum camouii</i>						133
<i>Spatoglossum</i>	<i>Spatoglossum howeii</i>						92
<i>Sphacelaria</i>	<i>Sphacelaria californica</i>			129			

<i>Taonia</i>	<i>Taonia leenebackerae</i>	131	
<i>Zonaria</i>	<i>Zonaria</i> sp.		83

RHODOPHYTA

<i>Gigartina</i>	<i>Gigartina tepida</i>			80
	<i>Gigartina macdogualii</i>	105		
	<i>Gigartina</i> sp.	123, 111, 109	77, 54	133, 41
<i>Acantophora</i>	<i>Acantophora</i> sp.	115		
	<i>Acanthophora spicifera</i>		74	
<i>Ahnfeltiopsis</i>	<i>Ahnfeltiopsis leptophylla</i>		54, 77	92, 95, 98
	<i>Ahnfeltiopsis</i> sp.			2
<i>Amphiroa</i>	<i>Amphiroa beauvoisii</i>	108		
	<i>Amphiroa misalciens</i>			96
<i>Bostrychia</i>	<i>Bostrychia</i> sp.			159, 155,
<i>Calcarea</i>	<i>Calcarea</i> sp.			43, 133
<i>Caloglossa</i>	<i>Caloglossa</i> sp.			159
<i>Centrocera</i>	<i>Centrocera clavulatum</i>		65, 75-B	96
	<i>Centroceras</i> sp.		74	
<i>Ceramial</i>	<i>Ceramial</i> sp.		75-B	
<i>Champia</i>	<i>Champia</i> sp.		83	
<i>Chondria</i>	<i>Chondria californica</i>	105		
<i>Coralina</i>	<i>Coralina</i> sp.	123		
<i>Dasya</i>	<i>Dasya baillouviana</i>			74
<i>Digenia</i>	<i>Digenia simplex</i>		82, 83	
<i>Estruveopsis</i>	<i>Estruveopsis robusta</i>	123		
<i>Eucheuma</i>	<i>Eucheuma uncinatum</i>	113, 108	131	
	<i>Eucheuma</i> sp.	115, 109		
<i>Gelidium</i>	<i>Gelidium sclerophyllum</i>	115		2

	<i>Gelidium</i> sp.				79	
<i>Gracilaria</i>	<i>Gracilaria vermiculophylla</i>	110	126	81, 74, 80, 83, 77		155, 31, 46, 157, 156, 96
	<i>Gracilaria pacifica</i>		126		82	136, 41
	<i>Gracilaria turgida</i>	117			91, 81	133
	<i>Gracilaria spinigera</i>		131, 130			133
	<i>Gracilaria verrucosa</i>	106	131		81	
	<i>Gracilaria pacifica</i>		129			
	<i>Gracilaria versicolor</i>					96
	<i>Gracilaria crispata</i>			91, 83, 87, 81		
	<i>Gracilaria subsecundata</i>	117		54, 74, 81		
	<i>Gracilaria</i> sp.	114, 111, 108, 105		80, 74, 82, 83, 81		160, 156, 159
	<i>Gracilariopsis lemneiformis</i>				53	
<i>Grateloupia</i>	<i>Grateloupia</i> sp.	121	126		83	132, 96
	<i>Grateloupia filicina</i>					95, 97
	<i>Grateloupia versicolor</i>					96
	<i>Grateloupia howeii</i>					97
	<i>Grateloupia abbreviatus</i>				81	
<i>Gymnogongrus</i>	<i>Gymnogongrus guadalupensis</i>					133
	<i>Gymnogongrus</i> sp.	123, 121 111		81, 83, 77, 87		
<i>Halymenia</i>	<i>Halymenia actinophysa</i>		131			
	<i>Halymenia</i> sp.	105, 121, 116, 111				94, 156
	<i>Hypnea valentiae</i>			83, 74, 82		96
	<i>Hypnea pannosa</i>			83		96
	<i>Hypnea lomentaria</i>	108				
	<i>Hypnea johnstonii</i>			83, 87		94
	<i>Hypena spinella</i>			87		
<i>Laurencia</i>	<i>Laurencia</i> sp.	121	131	79, 82, 87, 83, 90		
	<i>Laurencia paniculata</i>	117				
	<i>Laurencia pacifica</i>	117, 116, 115	74, 90		91, 87, 156	

	<i>Laurencia papillosa</i>			53	
<i>Polysiphonia</i>	<i>Polysiphia nalhaniellii</i>				92
	<i>Polysiphonia mollis</i>	106	130	85	136
	<i>Polysiphonia pacifica</i>				31
	<i>Polysiphia paniculata</i>			82	31
	<i>Polysiphonia johnstonii</i>		131	79, 74	
	<i>Polysiphonia</i> sp.		128	83	
<i>Porfira</i>	<i>Porfira</i> sp.	106			
<i>Prionitis</i>	<i>Prionitis</i> sp.			81	132
	<i>Prionitis abbreviata</i>	108			132
<i>Rhodoglossum</i>	<i>Rhodoglossum</i> sp.	126, 123, 115			
<i>Rhodymenia</i>	<i>Rhodymenia</i> sp.		131	77	
<i>Schizymenia</i>	<i>Schizymenia</i> sp.	108			
	<i>Schizymenia pacifica</i>	107, 105			
<i>Scinaia</i>	<i>Scinaia confunsa</i>			131	
	<i>Scinaia johnstoniae</i>			131	
	<i>Scinaia latifrons</i>	105			
<i>Spyridia</i>	<i>Spyridia filamentosa</i>		126	86, 74, 80, 83, 57	46, 156, 157
	<i>Spyridia</i> sp.	123		80, 81, 82, 90	
<i>Weeksia</i>	<i>Weeksia coccinea</i>	112			
<i>Zanordinula</i>	<i>Zanordinula abbreviata</i>				133

R1=region 1, R2= region 2, R3= region 3, R4= region 4. Los números indican el GC donde se encuentran cada una de las especies.

Anexo 4. Rango de concentración de Hg, Cd y As ($\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) de macroalgas recolectadas en el Golfo de California, durante marzo del 2008 y 2009.

Especie	Hg $\mu\text{g/g}$	Cd $\mu\text{g/g}$	As $\mu\text{g/g}$
<i>Ahnfeltiopsis leptophylla</i>	0.03-1.16	0.55-4.55	2.97-4.18
<i>Bostrychia</i> sp.	0.05-0.12	0.20-0.46	
<i>Centrocera clavulatum</i>	0.02-0.23	0.80-2.75	3.60-74.99
<i>Chaetomorpha annterina</i>	0.07-0.19	1.25-4.11	0.70-3.95
<i>Codium</i> sp.	0.03-0.09	0.93-6.12	3.54-8.98
<i>Colpomenia ramosa</i>	0.06-1.08	0.71-2.98	3.5-6.94
<i>Colpomenia sinuosa</i>	0.04-0.72	1.55-5.53	2.28-6.98
<i>Colpomenia</i> sp.	0.01-0.18	0.87-6.43	2.99-6.88
<i>Colpomenia tuberculata</i>	0.01-5.61	0.05-10.6	1.64-15.56
<i>Dictyota</i> sp.	0.01-0.51	0.08-5.73	3.02-5.31
<i>Gigartina</i> sp.	0.01-0.21	0.73-15.83	3.12-5.84
<i>Gracilaria crispata</i>	0.01-0.37	1.10-3.25	3.29-3.61
<i>Gracilaria pacifica</i>	0.03-0.11	0.85-5.73	2.11-5.88
<i>Gracilaria</i> sp.	0.01-2.62	0.16-4.87	2.32-6.57
<i>Gracilaria subsecundata</i>	0.02-2.80	0.09-6.11	2.72-3.27
<i>Gracilaria turgida</i>	0.01-0.20	0.71-5.62	2.74-3.35
<i>Gracilaria vermiculophylla</i>	0.01-6.61	0.02-4.06	2.10-9.02
<i>Grateloupia</i> sp.	0.02-0.33	0.50-5.72	2.76-4.16
<i>Gymnogongrus</i> sp.	0.01-0.636	0.54-5.57	2.78-10.41
<i>Hydroclathrus clathratus</i>	0.04-5.61	0.06-4.25	3.48-5.62
<i>Hypnea</i> sp.	0.02-0.35	0.92-6.26	3.16-5.68
<i>Laurencia pacifica</i>	0.01-0.1	0.94-3.36	3.02-3.35
<i>Laurencia</i> sp.	0.01-0.30	0.93-4.92	2.85-6.63
<i>Padina durvillae</i>	0.01-5.61	0.05-9.56	1.64-15.56
<i>Padina</i> sp.	0.01-0.35	1.13-5.03	2.13-7.36
<i>Polysiphonia mollis</i>	0.04-0.10	2.08-3.40	2.91-3.22
<i>Rhodoglossum</i> sp.	0.04-0.13	0.13-1.79	3.32-6.04
<i>Sargassum herporhizum</i>	0.02-0.11	1.22-3.98	3.28-7.47
<i>Sargassum horridum</i>	0.08-0.13	0.24-8.81	2.64-9.66
<i>Sargassum johnstonii</i>	0.01-0.29	0.78-9.07	2.53-8.35
<i>Sargassum muticum</i>	0.01-0.13	2.76-4.1	9.08-10.47
<i>Sargassum sinicola</i>	0.02-0.34	0.59-8.63	2.0-10.82
<i>Sargassum</i> sp.	0.01-5.61	0.05-10.6	1.64-15.56
<i>Spyridia filamentosa</i>	0.02-4.13	0.68-4.62	3.74-7.78
<i>Spyridia</i> sp.	0.02-0.47	1.78-6.00	1.38-8.37
<i>Ulva acanthophora</i>	0.02-0.68	0.02-9.55	3.20-5.18

<i>Ulva clathrata</i>	0.05-0.32	0.03-2.09	2.91-5.83
<i>Ulva compressa</i>	0.05-0.28	0.34-0.96	3.81-5.28
<i>Ulva expansa</i>	0.03-0.07	0.03-0.10	
<i>Ulva fasciata</i>	0.04-0.31	0.03-2.00	2.9
<i>Ulva flexosa</i>	0.03-4.48	0.26-5.68	2.13-6.95
<i>Ulva intestinalis</i>	0.01-0.22	0.06-4.77	3.20-6.47
<i>Ulva lactuca</i>	0.01-3.59	0.03-3.73	2.13-6.56
<i>Ulva sp.</i>	0.02-4.09	0.05-8.19	3.08-8.42

Anexo 5. Rango de concentración de Hg y Cd ($\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) de macroalgas recolectadas en las lagunas costeras de Sinaloa en temporada de secas y lluvias.

Especie	Localidad	Cd $\mu\text{g g}^{-1}$	Hg $\mu\text{g g}^{-1}$
<i>Bostrychia</i> sp.	Estero de Urias, Mazatlan, Sin.	0.08-0.12	0.23-0.141
<i>Colpomenia ramosa</i>	Ohuira, Sin.	2.98	
<i>Caulerpa sertulariodes</i>	Altata, Sin.	0.22-0.51	0.06-0.16
<i>Caulerpa sertulariodes</i>	Estero de Urias, Mazatlan, Sin.	0.13-0.14	0.11-0.13
<i>Caulerpa sertulariodes</i>	Navachiste, Sin	0.07-0.85	0.08-0.10
<i>Caulerpa sertulariodes</i>	Ohuira, Sin.	0.99-0.54	0.10-0.12
<i>Caulerpa sertulariodes</i>	Santa Ma. La Reforma, Sin.	0.23-0.65	0.03-0.13
<i>Codium amplivesiculatum</i>	Navachiste, Sin.	0.76-1.45	0.05-0.10
<i>Colpomenia tuberculata</i>	Navachiste, Sin.	1.83	0.08
<i>Dictyota</i> sp.	Santa Ma. La Reforma, Sin.	1.98-2.98	0.05-.12
<i>Gracilaria crispata</i>	Navachiste, Sin.	2.35	0.07
<i>Gracilaria vermiculophylla</i>	Altata, Sin.	0.23-0.25	0.05-0.07
<i>Gracilaria vermiculophylla</i>	El Colorado, Sin.	0.05-1.4	0.01-0.2
<i>Gracilaria vermiculophylla</i>	Navachiste, Sin	0.16-2.59	0.01-0.06
<i>Gracilaria vermiculophylla</i>	Santa Ma. La Reforma, Sin.	1.45-3.62	0.02
<i>Gracilaria vermiculophylla</i>	Estero de Urias, Mazatlan, Sin.	0.05-0.08	0.04-0.09
<i>Hypnea valentiae</i>	Altata Ensenada el Pabellon	1.73	0.08
<i>Hypnea valentiae</i>	Navachiste, Sin	1.35	0.11
<i>Padina durvillae</i>	Navachiste, Sin	0.31-0.41	0.13-0.17
<i>Sargassum sinicola</i>	Navachiste, Sin	4.96-5.82	0.7-0.12
<i>Spyridia filamentosa</i>	Altata, Sin.	2.96	0.09
<i>Spyridia filamentosa</i>	Navachiste, Sin	3.45-10.88	0.06-0.18
<i>Spyridia filamentosa</i>	Santa Ma. La Reforma, Sin.	1.01-5.66	0.04-0.10
<i>Ulva compressa</i>	Altata Ensenada el Pabellon	0.49	0.05
<i>Ulva intestinalis</i>	Ohuira, Sin.	0.59-0.75	0.08-0.09
<i>Ulva lactuca</i>	Santa Ma. La Reforma, Sin.	0.68-1.86	0.06-0.81
<i>Ulva lactuca</i>	Estero de Urias, Mazatlan, Sin.	0.14-0.91	0.09-0.10

Anexo 6. Rango de concentración de Hg y Cd ($\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco) de macroalgas recolectadas en el Estero de Urias, durante marzo del 2009-marzo del 2010.

Especie	Hg $\mu\text{g g}^{-1}$	Cd $\mu\text{g g}^{-1}$
<i>Bostrychia radicans</i>	0.10-0.55	0.01-0.63
<i>Bryopsis corticulans</i>	0.02-1.19	0.06-1.75
<i>Bryopsis pennatula</i>	0.20-0.91	0.10-3.88
<i>Caloglossa leprieurii</i>	0.07-0.63	0.09-1.75
<i>Caulerpa sertularioides</i>	0.03-4.24	0.02-1.25
<i>Ceramium mazatlanense</i>	0.20-4.02	0.21-1.97
<i>Chaetomorpha linum</i>	0.05-0.52	0.11-0.80
<i>Cladophora columbiana</i>	0.02-2.50	0.17-1.36
<i>Dictyota dichotoma</i>	0.05-0.77	0.08-0.60
<i>Ectocarpus simulans</i>	0.02-1.25	0.03-6.38
<i>Gracilaria vermiculophylla</i>	0.01-5.46	0.01-1.16
<i>Grateloupia filicina</i>	0.05-2.08	0.01-1.19
<i>Grateloupia versicolor</i>	0.01-0.19	0.03-1.36
<i>Polysiphonia pacifica</i>	0.08-1.16	0.45-2.32
<i>Rhizoclonium riparium</i>	0.05-0.32	0.02-0.61
<i>Ulva clathrata</i>	0.04-1.26	0.03-0.34
<i>Ulva expansa</i>	0.03-3.18	0.03-1.54
<i>Ulva flexosa</i>	0.05-1.16	0.03-1.48
<i>Ulva intestinalis</i>	0.03-3.19	0.01-1.90
<i>Ulva lactuca</i>	0.04-0.41	0.01-0.82
<i>Ulva lobata</i>	0.03-0.44	0.01-1.58