



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**VARIACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DE METALES Y
ARSÉNICO EN AGUA Y SEDIMENTO DE LA LAGUNA
COSTERA DE CHELEM YUCATÁN, MÉXICO.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**LICENCIADA EN MANEJO
SUSTENTABLE DE ZONAS COSTERAS**

P R E S E N T A:

TOVAR CONTRERAS MARIELA TALIA



**DIRECTORA DE TESIS:
DRA. FLOR E. ARCEGA CABRERA
2016**

Ciudad Universitaria, CDMX



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

Hoja de datos del jurado

1. Datos del alumno

Apellido paterno
Apellido materno
Nombre(s)
Teléfono
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias
Carrera
Número de cuenta

2. Datos del tutor

Grado
Nombre(s)
Apellido paterno
Apellido materno

3. Datos del sinodal 1

Grado
Nombre(s)
Apellido paterno
Apellido materno

4. Datos del sinodal 2

Grado
Nombre(s)
Apellido paterno
Apellido materno

5. Datos del sinodal 3

Grado
Nombre(s)
Apellido paterno
Apellido materno

6. Datos del sinodal 4

Grado
Nombre(s)
Apellido paterno
Apellido materno

7. Datos del trabajo escrito

Título

Número de páginas

Año

1. Datos del alumno

Tovar
Contreras
Mariela Talia
9992084142
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias
Manejo Sustentable de Zonas Costeras
308277856

2. Datos del tutor

Dra
Flor Elisa del Rosario
Arcega
Cabrera

3. Datos del sinodal 1

M. en C.
María del Carmen
Galindo
De Santiago

4. Datos del sinodal 2

Dr
Joaquín Rodrigo
Garza
Pérez

5. Datos del sinodal 3

Dra
Gabriela
Rodríguez
Fuentes

6. Datos del sinodal 4

Dra
Laura Elena
Vidal
Hernández

7. Datos del trabajo escrito

Variación espacial y temporal de metales y arsénico en agua y sedimento de la laguna costera de Chelem Yucatán, México.

104

2016

Yo honro el lugar dentro de ti donde el Universo entero reside. Yo honro el lugar dentro de ti de amor y luz, de verdad y paz. Yo honro el lugar dentro de ti donde cuando tú estás en ese punto tuyo, y yo estoy en ese punto mío, somos sólo Uno.
Namasté.

*A Luz María Contreras Albarrán, por ser la más sublime
expresión del universo...*

Agradecimientos

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México por ser mi *alma mater* y mi segunda casa.

A mi directora de tesis Flor E. Arcega Cabrera por su tiempo, aportaciones y paciencia para llevar a cabo el presente trabajo.

A los miembros del comité revisor de tesis: Dr. Rodrigo Garza Pérez, M. en C. Carmen Galindo de Santiago, Dra. Gabriela Rodríguez Fuentes y Dra. Laura Vidal Hernández, por sus valiosas aportaciones y comentarios que permitieron el enriquecimiento de este trabajo.

A la Dra. Elsa Noreña Barroso y al I. Q. Ismael Ocegüera Vargas por el apoyo técnico durante el trabajo en laboratorio.

Agradecimientos personales

Al universo por manifestarme su bondad a través de personas, lugares, situaciones y objetos. Gracias por el aquí y el ahora, por este mi momento.

A Luz María Contreras Albarrán por enseñarme a amar y agradecer las diferentes formas de expresión del universo. Por su bondad, calidez, atenciones, cuidados y palabras. Gracias por ser la más dulce melodía en mi vida, por aportarme momentos de paz y de calma. Gracias por ayudarme siempre a extender mis alitas y darme el ánimo y el aliento para salir adelante. Por ser la expresión más sublime del universo, esa su expresión de amor. Te amo mamá.

A mi papá Gerardo Tovar Ortiz, porque a pesar de nuestras diferencias eres un pilar muy importante en mi formación. Gracias por tus sonrisas y esos nuestros momentos especiales. Te amo papá.

A mi hermanito Luis Fernando Tovar Contreras por su amor y paciencia. Gracias por apoyarme en todas mis locuras y ocurrencias, por tu valentía y entrega. Por irradiar esa tu preciosa energía y alegrar mi vida. Porque también gracias a ti, mis sueños se están materializando. Te amo bebé.

A mi sagrada familia: mis abuelitos Agustina, Ernesto, Rosa y Toño por sus cuidados, consejos y por tenerme presente en sus oraciones. A mis fabulosas tías: Esme, Rubí, Lu, Félix, Carmen y Angelita por su apoyo y entrega durante esta etapa de mi vida. A mis primos: Yessi, Mari y Richi por su apoyo siempre que lo necesité, los quiero.

A Flor Arcega por su cariño, atenciones y apoyo en todo momento. Por sus palabras y acciones que surtieron efecto de una forma muy positiva. Le agradezco el haber estado siempre para mí. Te quiero.

A papá Cisne (M. en C. Héctor Cisneros Reyes) por estar siempre pendiente de mí. Por el apoyo que me brindó infinitas veces, así como sus palabras de aliento y confort. Por ser una gran bendición durante mi estancia en Sisal. Muchas gracias papá Cisne.

A Gilberto Jerónimo Moreno (†) por su cariño y tan sabias palabras. Por sus clases increíbles y sobre todo por ser el tutor más genial de genialolanda. ¡Gracias por todo lo que me aportaste durante tu viaje en este plano.

A la 5ta generación de la LMSZC por todos los momentos compartidos en el aula y fuera de ella. Por nuestras aventuras en el bello Yucatán. En especial a Olga Salas Fernández por todas las aventuras, todo lo compartido y por hacer de esta experiencia en Sisal algo único. A Manuel Hernández Galicia por alegrarme, motivarme y hacer siempre inolvidables todos nuestros momentos, te quiero chuletin. A Eleazar Moreno García por su paciencia, cariño, amistad y sobre todo por acompañarme, animarme y por compartir su tiempo y espacio conmigo, te quiero huercolines.

Al Lic. Salvador E. Muñúzuri Hernández director del CEJA A. C. por su gran apoyo en mi formación académica y por ser siempre tan generoso conmigo. Muchas gracias Lic.

A mis amigos: Alfonso Rito Morales por ser tan paciente conmigo, por ser mi sistema buffer y mi catalizador, Karla Lisbeth Villafuerte Trejo por el apoyo y cariño y Marcos Alejandro Rodríguez Arana por su apoyo, cariño y amistad. Los quiero.

A Quilava por animarme con esos bellos ojos de capulín, con sus travesuras y ocurrencias. Gracias por permanecer siempre en mi corazón, te amo.

A Mérida, Mini, Blasse, Blacky y Goku por ser mi inspiración y mi fuerza. Por ser la expresión más pura de inocencia, amor y fidelidad. Los amo bebés.

Al hermoso estado de Yucatán por ser el escenario de mis aventuras y mi trayectoria universitaria.

Índice

Índice de figuras	1
Índice de tablas	3
ABREVIATURAS	5
Resumen	6
INTRODUCCIÓN	8
MARCO TEÓRICO	9
Cobre (Cu)	9
Estaño (Sn)	10
Arsénico (As).....	11
Cromo (Cr)	13
Cadmio (Cd)	14
Plomo (Pb).....	15
Níquel (Ni).....	15
Screening Quick Reference Tables (SQuiRts)	16
ANTECEDENTES	17
JUSTIFICACIÓN.....	18
Área de estudio	19
Descripción geográfica de la laguna costera de Chelem	19
Clima	19
Vegetación	19
Aspectos socioeconómicos generales.....	19
Población	20
Actividades productivas	20
Turismo.....	20
Marginación social	20
Características de la vivienda	21
Educación	21
HIPÓTESIS	22
OBJETIVOS.....	23
Objetivo general	23
Objetivos particulares.....	23
METODOLOGÍA.....	24

Selección de los sitios de muestreo	24
Fuentes de contaminación	24
Sitios y temporalidad de muestreo	24
Colecta de muestras, medición de parámetros fisicoquímicos y almacenamiento.....	26
Procedimientos de laboratorio	26
Análisis de sedimentos	27
a) Granulometría.....	27
b) Determinación de materia orgánica.....	27
c) Digestión ácida total de sedimentos asistida con horno de microondas.	28
d) Determinación de la concentración total de metales por absorción atómica	28
Análisis de metales en la columna de agua	30
a) Metales en columna de agua	30
b) Sólidos Suspendidos Totales y Materia Orgánica en agua	30
Análisis estadístico	31
RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	32
Parametros fisicoquímicos.....	32
Profundidad	32
Salinidad	33
Temperatura.....	34
Oxígeno disuelto (OD)	35
pH	36
Potencial Eh del agua	37
Sólidos suspendidos (SS)	38
%OMSS	40
%MO	41
Metales y As	42
Plomo (Pb).....	42
Cadmio (Cd).....	45
Arsénico (As).....	48
Cobre (Cu)	50
Estaño (Sn)	52
Cromo (Cr)	55
Níquel (Ni).....	57
Ubicación de los sitios que pasan los valores recomendados de SQuiRTs	59

Sitios que rebasan valores de SQuiRTs en sedimento durante la temporada de lluvias. .	60
Sitios que rebasan valores de SQuiRTs en sedimento durante la temporada de Nortes. .	61
Sitios que rebasan valores de SQuiRTs en sedimento durante la temporada de secas.	62
Contaminación anual por metales en sedimento.	63
Sitios que rebasan valores de Toxicidad Aguda (SQuiRTs) en agua en temporada de lluvias	64
Sitios que rebasan valores de Toxicidad Aguda (SQuiRTs) en agua en temporada de Nortes	65
Sitios que rebasan valores de Toxicidad Aguda (SQuiRTs) en agua en temporada de secas.....	66
Toxicidad aguda anual (SQuiRTs) por metales en agua	67
Sitios que rebasan valores de Toxicidad Crónica (SQuiRTs) en agua en temporada de lluvias	68
Sitios que rebasan valores de Toxicidad Crónica (SQuiRTs) en agua en temporada de Nortes	69
Sitios que rebasan valores de Toxicidad Crónica (SQuiRTs) en agua en temporada de secas.....	70
Toxicidad crónica anual.....	71
Conclusiones.....	73
Análisis del marco jurídico-administrativo para la disminución y prevención de la contaminación por metales y fortalecimiento de estrategias de manejo en la laguna costera de Chelem, Yucatán	75
LITERATURA CITADA.....	86
Legislación consultada	93
ANEXOS	94
Anexo 1. Pruebas de normalidad y de homocedasticidad de los datos referente a los metales y As.	94
Anexo 2. Marco jurídico- administrativo	95
Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (CPEUM)	95
Leyes del Congreso	95
Leyes Estatales, Yucatán	100
Anexo 3. Unidades de Gestión Ambiental, Progreso	104

Índice de figuras

Figura 1. Área de estudio: laguna de Chelem, Yucatán y sitios de muestreo con fuentes de contaminación. Tomado de Arcega-Cabrera <i>et al.</i> , 2015.	25
Figura 2. Variación espacio-temporal de la profundidad de la laguna de Chelem.....	33
Figura 3. Variación espacio-temporal de la salinidad del agua de la laguna de Chelem.	34
Figura 4. Variación espacio-temporal de la temperatura del agua de la laguna de Chelem.	35
Figura 5. Variación espacio-temporal del oxígeno disuelto en el agua de la laguna de Chelem.....	36
Figura 6. Variación espacio-temporal del pH del agua de la laguna de Chelem.....	37
Figura 7. Variación espacio-temporal del potencial Eh en el agua de la laguna de Chelem.	38
Figura 8. Variación espacio-temporal de los sólidos suspendidos en agua de la laguna de Chelem.....	39
Figura 9. Variación espacio-temporal del porcentaje de materia orgánica sólidos suspendidos de la laguna de Chelem.	40
Figura 10. Variación espacio-temporal del porcentaje de materia orgánica en sedimento de la laguna de Chelem.	42
Figura 11. Concentraciones de Pb obtenidas en sedimento superficial de la laguna de Chelem (TEL Pb=30.24 $\mu\text{g g}^{-1}$).....	43
Figura 12. Concentración total de Pb en agua de la laguna de Chelem (Toxicidad Aguda: 210 $\mu\text{g L}^{-1}$, línea roja; toxicidad crónica, 8.1 $\mu\text{g L}^{-1}$, línea morada; Screening Quick Reference Tables).	45
Figura 13. Concentraciones de Cd obtenidas en sedimento superficial de la laguna de Chelem y el límite establecido como criterio ecológico (TEL= 0.680 $\mu\text{g g}^{-1}$, línea roja).	46
Figura 14. Concentración total de Cd en agua de la laguna de Chelem. (Toxicidad Aguda: 40 $\mu\text{g L}^{-1}$, línea roja toxicidad crónica, 8.8 $\mu\text{g L}^{-1}$, línea morada; Screening Quick Reference Tables).	47
Figura 15. Concentraciones de As obtenidas en sedimento superficial de la laguna de Chelem y el límite establecido como criterio ecológico (TEL= 7.240 $\mu\text{g g}^{-1}$, línea roja).	49
Figura 16. Concentración total de As en agua de la laguna de Chelem (Toxicidad Aguda: 69 $\mu\text{g L}^{-1}$, línea roja; toxicidad crónica, 36 $\mu\text{g L}^{-1}$, línea morada; Screening Quick Reference Tables).	50
Figura 17. Concentraciones de Cu obtenidas en sedimento superficial de la laguna de Chelem y el límite establecido como criterio ecológico (TEL 18.7 $\mu\text{g g}^{-1}$, línea roja).	51
Figura 18. Concentración total de Cu en agua de la laguna de Chelem. Toxicidad Aguda: 4.8 $\mu\text{g L}^{-1}$, línea roja, toxicidad crónica, 3.1 $\mu\text{g L}^{-1}$, línea morada (Screening Quick Reference Tables).	52
Figura 19. Concentraciones de Sn obtenidas en sedimento superficial de la laguna de Chelem y el límite establecido como criterio ecológico (TEL=3.4 $\mu\text{g g}^{-1}$, línea roja).	54
Figura 20. Concentración total de Sn en agua de la laguna de Chelem. No se indica toxicidad (Screening Quick Reference Tables).	55
Figura 21. Concentraciones de Cr obtenidas en sedimento superficial de la laguna de Chelem (TEL= 52.3 $\mu\text{g g}^{-1}$).	56

Figura 22. Concentración total de Cr en agua de la laguna de Chelem. No se indica toxicidad para Cr total (Screening Quick Reference Tables).....	57
Figura 23. Concentraciones de Ni obtenidas en sedimento superficial de la laguna de Chelem y el límite establecido como criterio ecológico (TEL= 15.9 $\mu\text{g g}^{-1}$, línea roja).....	58
Figura 24. Concentración total de Ni en agua de la laguna de Chelem (Toxicidad Aguda: 74 $\mu\text{g L}^{-1}$, línea roja, toxicidad crónica, 8.2 mg L^{-1} , línea morada; Screening Quick Reference Tables).....	59
Figura 25. Se presentan los sitios que rebasan valor recomendado de SQuiRTs en sedimento durante la temporada de lluvias. Las estaciones con más metales que rebasan valores recomendados son las estaciones 1 y 11. Tomado de Arcega-Cabrera <i>et al.</i> , 2015.	61
Figura 26. Se presentan los sitios que rebasan valor recomendado de SQuiRTs en sedimento durante la temporada de Nortes. Tomado de Arcega-Cabrera <i>et al.</i> , 2015.....	62
Figura 27. Se presentan los sitios que rebasan valor recomendado de SQuiRTs en sedimento durante la temporada de secas. Las estaciones con más metales que rebasan valores recomendados son las estaciones 6, 7, 8, 9, 10, 11 y 12. Tomado de Arcega-Cabrera <i>et al.</i> , 2015.....	63
Figura 28. Contaminación por metales en sedimento durante las temporadas representativas de la zona, lluvias, en agosto del 2011; Nortes, noviembre de 2012 y secas, mayo del 2012. Las estaciones que más metales presentaron son las estaciones 1, 4, 7, 9, 10, 11. Tomado de Arcega-Cabrera <i>et al.</i> , 2015.....	64
Figura 29. Toxicidad aguda por metales en agua en la temporada de lluvias. Las estaciones con más metales que rebasan valores recomendados son las estaciones 2, 3 y 1. Tomado de Arcega-Cabrera <i>et al.</i> , 2015.....	65
Figura 30. Toxicidad aguda por metales en agua en temporada de Nortes. En la estación 6 se registraron más metales que rebasaron el valor de norma. Tomado de Arcega-Cabrera <i>et al.</i> , 2015.....	66
Figura 31. Toxicidad aguda por metales en agua en temporada de secas. Sólo se obtuvo que el Cu rebaso valor de SQuiRTs en la estación 9. Tomado de Arcega-Cabrera <i>et al.</i> , 2015.	67
Figura 32. Toxicidad aguda anual. La estación 6 fue la que anualmente registró mayores concentraciones de metales. Tomado de Arcega-Cabrera <i>et al.</i> , 2015.....	68
Figura 33. Toxicidad crónica por metales en agua en temporada de lluvias. En la estación 1 se registraron más metales que rebasaron el valor de norma. Tomado de Arcega-Cabrera <i>et al.</i> , 2015.....	69
Figura 34. Toxicidad crónica por metales en la temporada de nortes. En la estación 6 se registraron más metales que rebasaron el valor de norma. Tomado de Arcega-Cabrera <i>et al.</i> , 2015.....	70
Figura 35. Toxicidad crónica por metales en agua en la temporada de secas. La estación 5 y 9 presentan concentraciones que rebasan valores de SQuiRTs. Tomado de Arcega-Cabrera <i>et al.</i> , 2015.....	71
Figura 36. Toxicidad crónica anual en agua. En la estación 1 se registraron más metales que rebasaron el valor de norma. Tomado de Arcega-Cabrera <i>et al.</i> , 2015.....	72
Figura 37. Unidades de Gestión Ambiental de Progreso, Yucatán México. Fuente: Programa de Ordenamiento Ecológico del Territorio Costero del Estado de Yucatán (POETCY).....	104

Índice de tablas

Tabla 1. Localización de las estaciones de muestreo de la laguna de Chelem-Progreso, Yucatán.	25
Tabla 2. Análisis de la variación espacial y temporal de la profundidad de la laguna de Chelem, pruebas de Kruskal-Wallis.	32
Tabla 3. Análisis de la variación espacial y temporal de la salinidad de la laguna de Chelem, pruebas de Kruskal-Wallis.	33
Tabla 4. Análisis de la variación espacial y temporal de la temperatura de la laguna de Chelem, pruebas de Kruskal-Wallis.	34
Tabla 5. Análisis de la variación espacial y temporal del oxígeno disuelto de la laguna de Chelem, pruebas de Kruskal-Wallis.	36
Tabla 6. Análisis de la variación espacial y temporal del pH de la laguna de Chelem, pruebas de Kruskal-Wallis.	37
Tabla 7. Análisis de la variación espacial y temporal del Eh de la laguna de Chelem, pruebas de Kruskal-Wallis.	38
Tabla 8. Análisis de la variación espacial y temporal de SS de la laguna de Chelem, pruebas de Kruskal-Wallis.	39
Tabla 9. Análisis de la variación espacial y temporal de %OMSS de la laguna de Chelem, pruebas de Kruskal-Wallis.	40
Tabla 10. Análisis de la variación espacial y temporal de %MO de la laguna de Chelem, pruebas de Kruskal-Wallis.	41
Tabla 11. Variación espacial y temporal de Pb en sedimento de la laguna de Chelem, pruebas de ANOVA de una vía.	43
Tabla 12. Variación espacial y temporal de Pb en agua de la laguna de Chelem, pruebas de Kruskal-Wallis.	44
Tabla 13. Variación espacial y temporal de Cd en sedimento de la laguna de Chelem, pruebas de ANOVA de una vía.	46
Tabla 14. Variación espacial y temporal de Cd en agua de la laguna de Chelem, pruebas de Kruskal-Wallis.	47
Tabla 15. Variación espacial y temporal de As en sedimento de la laguna de Chelem, pruebas de ANOVA de una vía.	48
Tabla 16. Variación espacial y temporal de As en agua de la laguna de Chelem, pruebas de Kruskal-Wallis.	49
Tabla 17. Variación espacial y temporal de Cu en sedimento de la laguna de Chelem, pruebas de ANOVA de una vía.	51
Tabla 18. Variación espacial y temporal de Cu en agua de la laguna de Chelem, pruebas de Kruskal-Wallis.	52
Tabla 19. Variación espacial y temporal de Sn en sedimento de la laguna de Chelem, pruebas de Kruskal-Wallis.	53
Tabla 20. Variación espacial y temporal de Sn en agua de la laguna de Chelem, pruebas de Kruskal-Wallis.	55
Tabla 21. Variación espacial y temporal de Cr en sedimento de la laguna de Chelem, pruebas de Kruskal-Wallis.	56
Tabla 22. Variación espacial y temporal de Cr en agua de la laguna de Chelem, pruebas de Kruskal-Wallis.	57

Tabla 23. Variación espacial y temporal de Ni en sedimento de la laguna de Chelem, pruebas de Kruskal-Wallis.	58
Tabla 24. Variación espacial y temporal de Ni en agua de la laguna de Chelem, pruebas de Kruskal-Wallis.....	59
Tabla 25. Valores recomendados de SQuiRTs de metales y As en agua.	60
Tabla 26. Valores recomendados de SQuiRTs de metales y As en sedimento.	60

ABREVIATURAS

Abreviatura	Significado
Pb	Plomo
Cd	Cadmio
As	Arsénico
Cu	Cobre
Sn	Estaño
Cr	Cromo
Ni	Níquel
pH	Potencial de hidrógeno
%MO	Porcentaje de materia orgánica en sedimento
Eh	Potencial redox
SS	Sólidos suspendidos
%OMSS	Porcentaje de materia orgánica en sólidos suspendidos
OD	Oxígeno disuelto
T°	Temperatura
MO	Materia orgánica
TA	Toxicidad aguda
TC	Toxicidad crónica
SQuiRTs	Screening Quick Reference Tables
TEL	Threshold Effects Level/ Nivel de Efectos Mínimos
uma	Unidad de masa atómica
ppm	Partes por millón
ppb	Partes por billón
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
EPA	Environmental Protection Agency
CEPEUM	Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos
CPEY	Constitución Política del Estado de Yucatán
LGBN	Ley General de Bienes Nacionales
LFM	Ley Federal del Mar
LAN	Ley de Aguas Nacionales
LGEEPA	Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente
LGPGIR	Ley General de Prevención y Gestión Integral de los Residuos
LAEY	Ley Ambiental del Estado de Yucatán
LGIREY	Ley de Gestión Integral de los Residuos en el Estado de Yucatán
RLPAEY	Reglamento de la Ley de Protección al Ambiente del Estado de Yucatán
POETCY	Programa de Ordenamiento Ecológico del Territorio Costero del Estado de Yucatán
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
PROFEPA	Procuraduría Federal de Protección al Ambiente
SEDUMA	Secretaría de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente
NOM	Norma Oficial Mexicana
UGA	Unidad de Gestión Ambiental

Resumen

La laguna costera de Chelem es importante en términos ecológicos, económicos y sociales. Gracias a esta relevancia, ha fungido como escenario de diferentes prácticas y actividades, que han provisto de beneficios a pobladores y usuarios, sin embargo, el inadecuado tratamiento de los residuos, tales como sólidos y aguas domésticas, así como las actividades marítimo-portuarias e industriales, han provocado la presencia de contaminantes tóxicos como metales. Estos, poseen características de elevada toxicidad, alta persistencia y rápida acumulación por los organismos. Por ello que en el presente trabajo se determinaron las concentraciones de los metales Cu, Sn, Cr, Cd, Pb y Ni así como del metaloide As.

El muestreo se realizó en 12 puntos distribuidos alrededor de la orilla de la laguna, realizados durante las tres épocas hidrológicas representativas de la zona: lluvias en agosto de 2011, Nortes en noviembre de 2011 y secas en mayo de 2012. Estos sitios corresponden a un ojo de agua, tiraderos clandestinos de basura, desagües directos a la laguna, sitios donde se realizan actividades industriales y marítimo-portuarias. También se registraron los parámetros fisicoquímicos *insitu*: salinidad, temperatura, oxígeno disuelto, pH, potencial Eh del agua, sólidos suspendidos, porcentaje de sólidos suspendidos y materia orgánica.

Para el análisis de metales la técnica analítica empleada fue espectrometría de absorción atómica con horno de grafito, llama aire/acetileno y generador de hidruros. Posteriormente se realizó el análisis estadístico para considerar las diferencias espaciales y temporales en la concentración de los metales.

Debido a la falta de normas de concentración de metales en agua y sedimento se compararon los resultados obtenidos con niveles permisibles emitidos por la NOAA (SQuiRTs-Buchman, 2008). Se consideraron los intervalos de los valores de TEL (nivel de efecto mínimo) para sedimento y, Toxicidad Aguda y Toxicidad Crónica para agua.

Se obtuvo que en sedimento el Cd, As, Cu, Sn y Ni rebasaron dichos valores recomendados. Siendo el As y el Cu los metales que ya indican efectos evidentes en bivalvos y en larvas de ostras respectivamente. Nortes fue la temporada en la que mayormente los metales rebasaron los valores de la NOAA. Para el caso del agua, el Pb, Cd, As, Cu y Ni rebasaron los valores de TA y TC. Nortes también fue la temporada crítica de acumulación de metales. Se concluyó de forma general que la laguna de Chelem presenta contaminación por metales y As que puede afectar potencialmente al sistema.

Adicionalmente, se realizó una exhaustiva revisión de la legislación aplicable en la materia con el fin de identificar actores competentes y acciones para la atención de las fuentes puntuales de contaminación. Con ello se realizaron una serie de recomendaciones finales útiles y de urgente aplicación para la disminución y prevención de metales en la laguna. Aunque la laguna de Chelem es de jurisdicción federal, el Municipio de Progreso es el principal actor para atender esta problemática debido al inadecuado manejo de los residuos sólidos así como el de las aguas residuales. Posteriormente, se identificaron las estrategias de manejo que deben de fortalecerse en el tema. Las estrategias a fortalecer son:

“planeamiento y regulación del uso del suelo a nivel nacional o provincial (estatal)”, “evaluación de impactos ambientales de propuesta de desarrollo costero”, “atención de área crítica” y finalmente “lineamientos guía y regulaciones obligatorias”.

Palabras clave:

Lagua de Chelem, agua, sedimento, cobre, estaño, arsénico, cromo, cadmio, níquel, lluvias, Nortes, secas, SquiRTs, variación espacial y temporal, contaminación, basureros clandestinos, aguas residuales, actividades marítimo-portuarias.

INTRODUCCIÓN

México es un país costero bordeado por los océanos Pacífico, Atlántico y Mar Caribe. La zona costera tiene una longitud de 11,122 km (INEGI, 2010) y se caracteriza por sus variados y ricos ecosistemas costeros como bahías, ensenadas, lagunas costeras y estuarios que, por siglos, han representado un sustento importante. La zona costera es muy valiosa en términos ecológicos, sociales y económicos, por la gran diversidad de ecosistemas, hábitats, recursos naturales y por el desarrollo de importantes actividades económicas (Zárate, 2004).

En todo el país existen 130 lagunas costeras que abarcan un área de 15,000 km². Estas se definen geomorfológicamente como depresiones costeras, someras (<10 m), con su eje principal paralelo a la costa, conectada al mar temporal o permanentemente por uno o más canales y separada de él por una barrera física (Kjerve, 1994). Este tipo de ecosistemas costeros tienen importantes funciones como alta productividad primaria que permite ser un lugar de crianza, reproducción y resguardo de diversos organismos acuáticos (algunos de valor comercial), permitiendo así, concentrar un gran espectro de la biodiversidad. También una función importante que poseen es la protección a las zonas costeras ante las inundaciones asociadas al impacto de fenómenos meteorológicos extremos (CIMARES, 2002).

Las lagunas costeras son sitios que tienen una gran variedad de usos y sirven para diversas actividades humanas relacionadas con la alimentación, la obtención de energía, el transporte, la recreación y el urbanismo (Lasserre, 1979). Sin embargo, ciertas prácticas de aprovechamiento regulado y no regulado conllevan a efectos que alteran la estabilidad de estos ecosistemas, afecta la sustentabilidad de los recursos naturales y actúan sobre la salud de los seres vivos debido a la contaminación (Rojas, 2011). Dichas prácticas son por ejemplo: las descargas de aguas domésticas e industriales, aportes de agua de los mantos freáticos, arrastre y contaminación del suelo, aumento en la implementación de caminos costeros y el consecuente incremento en el tráfico de vehículos, la extracción petrolera y los desarrollos turísticos (NRC, 2000).

De acuerdo al diagnóstico más reciente, aproximadamente 75% de las lagunas costeras presenta algún síntoma de impacto, y es común observar problemas ambientales, sociales y hasta económicos derivados del deterioro de algunas lagunas costeras de Yucatán (Herrera-Silveira, 2006). Por ejemplo, las lagunas costeras Celestún, Chelem, Dzilam y Río Lagartos presentan problemas de contaminación e inclusive, la modificación de flujos de agua (Herrera-Silveira, 2006).

En el caso específico de la laguna de Chelem su condición en general va de regular a mala, ya que está directamente influenciada por las actividades antropocéntricas como: descargas de aguas residuales, modificación de flujos de agua, cambios de uso del suelo en los humedales adyacentes a ella, actividades marítimo-portuarias, así como la deposición directa de residuos sólidos (Herrera-Silveira y Morales-Ojeda, 2010; Luna *et al.*, 2002) que pueden traer consigo el aporte de metales y metaloides. Este aporte de metales perturba el

estado de la laguna y también pueden poner en riesgo la salud del ser humano (Botello y Páez, 1986; Paéz-Osuna *et al.*, 1987) volviéndose tóxicos cuando rebasan ciertos umbrales de concentración. Por ejemplo, el Cu, es esencial para los organismos marinos ya que intervienen en diversos procesos biológicos a baja concentración, mientras que otros, como el Pb y Cd, son particularmente tóxicos y no tienen un papel biológico conocido. (Marín-Guirao y Javier Lloret, 2008).

Uno de los principales procesos de los metales en los ecosistemas costeros es la bioacumulación, es decir, los organismos pueden almacenarlos en sus órganos o tejidos en concentraciones superiores a las del medio que los rodea. Este proceso es la base para el proceso de Biomagnificación, en el cual la concentración del metal incrementa a la par del nivel trófico, siendo especialmente relevante para el ser humano ya que este consume diversos organismos de niveles tróficos superiores (Botello *et al.*, 2010).

Los metales presentan mayor afinidad por los sólidos especialmente con recubrimientos orgánicos. Bajo ciertas circunstancias de variación hidrodinámica o fisicoquímica, los metales pueden pasar de los sedimentos hacia la fase acuosa, incrementando la exposición a metales en los organismos pelágicos (Kunz, 2000).

En general, la importancia que tiene el estudio de metales en agua y sedimento de la laguna de Chelem está dada por sus características: elevada toxicidad, alta persistencia y rápida acumulación por los organismos vivos (Rosas, 2011) por lo que resulta deseable conocer los daños potenciales y evidentes que ya se puedan estar presentando en la laguna.

Tomando en consideración este propósito es que este trabajo aborda de forma pormenorizada el tema de contaminación del agua y sedimento debido a la concentración de metales con efectos nocivos en los hábitat, la pesca y turismo; la salud de los habitantes de la zona costera en cuestión. Para ello el trabajo se enfoca en determinar las variaciones espaciales y temporales de Cu, Sn, As, Cr, Cd, Pb y Ni, para contribuir al diagnóstico de la calidad de la laguna de Chelem y por consiguiente a facilitar la toma de decisiones en proyectos, sobre todo en decisiones de manejo.

MARCO TEÓRICO

Cobre (Cu)

El Cu es un elemento con número atómico 24 y masa atómica de 63.546 uma (unidad de masa atómica). Es un metal dúctil con alta conductividad térmica y eléctrica. Es un metal paramagnético y puede presentar estados de oxidación desde 1⁺ hasta 4⁺ formando una gran variedad de compuestos en estados 1⁺ y 2⁺ denominados cuproso y cúprico respectivamente (Lippard y Berg, 1994). Es un metal ubicuo, se encuentra distribuido ampliamente y de manera natural en la biosfera, atmósfera, hidrósfera y en la geosfera. La concentración promedio del Cu (independientemente de su forma química) en la corteza terrestre es de

100 ppm; mientras que en agua de mar su concentración es de entre 0.5 ppb y 1 ppb en agua corriente (Hamilton, 1988).

El Cu puede entrar al medio ambiente por los residuos sólidos o líquidos de la minería, fábricas que manufacturan o usan Cu metálico o compuestos de Cu lixiviados de basureros, combustión de desperdicios y combustibles fósiles, de la producción de madera, de la producción de abonos de fosfato y de fuentes naturales. En los suelos o en los sedimentos el Cu puede adherirse fuertemente a la materia orgánica y a otros componentes (por ejemplo, arcilla, arena, etc.) limitando con ello su movilización y transporte. Cuando el Cu y los compuestos de Cu se liberan al agua, el Cu solvatado o adsorbido a las partículas en suspensión puede ser transportado hasta que cambios en la fisicoquímica o hidrodinámica del sitio promueven su depósito en los ríos, lagos y estuarios (ATSDR, 2004). La mayoría de los compuestos del Cu se depositarán y se enlazarán tanto a los sedimentos del agua como a las partículas del suelo. Los compuestos solubles del Cu son considerados la mayor amenaza para salud humana. Usualmente compuestos del Cu solubles en agua en el ambiente después de liberarse a través de aplicaciones en la agricultura (Lentech, 2008).

El Cu es un metal traza¹ esencial para todos los invertebrados marinos (Lewis y Cave, 1982; Sunda y Hanson, 1987) y forma parte de la estructura de más de 30 enzimas y de otras moléculas (oxidasas, hidrolasas, metalotioneínas, etc) (Harris, 1991). El Cu (III) es un micronutriente esencial, ya que es necesario para el metabolismo de los azúcares y para muchas reacciones enzimáticas (Lushchak *et al.*, 2009). A pesar de ser un metal esencial, una cantidad excesiva de Cu resulta tóxico e irritante para los organismos. Entre los efectos producidos por el Cu en peces se tienen: la coagulación del moco branquial e inhibición del transporte de oxígeno; destrucción de la vitamina C, debido a su papel como catalizador de oxidación activa; inhibición del crecimiento bacteriano y la alteración de la flora intestinal, etc. (Torres *et al.*, 1987; Bunton y Franzier, 1994). Exposiciones de largos periodos al Cu pueden irritar la nariz, la boca y los ojos y causar dolor de cabeza, de estómago, mareos, vómitos y diarreas, así como daños al hígado, riñones y puede causar la muerte (ATSDR, 2004). Cuando hay suelos ricos en Cu disminuye la biodiversidad de plantas (Lenntech 2008).

Estaño (Sn)

El Sn tiene número atómico 50 y masa atómica de 118 uma. Se encuentra en un estado de oxidación de 4⁺. Es un metal blanco-plateado que no se disuelve con el agua. Este metal se encuentra distribuido de forma natural en la corteza terrestre.

El Sn no se considera un elemento esencial para los seres humanos. Sin embargo, se considera un elemento fundamental que requieren algunos animales para crecer y desarrollarse. Los compuestos de Sn que son hidrófobos son tóxicos para una amplia variedad de organismos debido a su alta solubilidad en las membranas celulares. La inhalación de polvo de Sn da como resultado su deposición en los pulmones y puede causar

¹ Un elemento traza es el elemento presente en una muestra que posee una medida de concentración menor a 100 ppm.

“estannosis”, una neumoconiosis² benigna. En las exposiciones crónicas, el Sn tiende a acumularse en los riñones, el hígado y los huesos. Los huesos son sitios importantes de deposición de Sn después de la exposición a largo plazo y a la inyección intramuscular. La vida-media biológica del Sn en los huesos es aproximadamente 100 días. La exposición a altas concentraciones de Sn inorgánico puede causar enfermedades gastrointestinales, así como problemas en el hígado y los riñones. Algunos compuestos de alquilestano, en particular de tribulestano y trifenilestano, tienen alta toxicidad. La exposición crónica a compuestos de butilestano causa imposex³ (Oehlmann *et al.*, 1996; Ostrakhovitch, 2015).

La toxicidad de los compuestos orgánicos de estaño en los seres humanos se manifiesta con mayor frecuencia como pérdida de memoria, convulsiones, así como otros síntomas incluyendo la muerte. Aquil estaño de cadena corta, en particular los derivados de trietilestano, y los compuestos de estaño aromáticos son neurotóxicos. Compuestos de trimetilestano y trietilestano hidrófobos se difunden fácilmente en los tejidos lipófilicos tales como el cerebro y causar encefalopatía, edema cerebral y convulsiones severas. Derivados organoestánicos trisustituidos están implicados en la hepatotoxicidad, inmunodeficiencia, alteraciones endocrinas, y ambas anomalías reproductivas e infertilidad. Monobutilestano y dibutil estaño provocan genotoxicidad, mientras que mono- y dimetilestano no son genotóxicos. Compuestos orgánicos del estaño penetran en la membrana celular e interrumpen la fosforilación oxidativa, perturban la homeóstasis del calcio, daño en mitocondrias e induce a la apoptosis (Ostrakhovitch, 2015).

El Sn está presente en el latón, bronce, peltre y en algunos materiales para soldar. El Sn metálico se usa para revestir latas de alimentos, bebidas y aerosoles. Los compuestos inorgánicos de Sn se usan en pasta dental, perfumes, jabones, aditivos para alimentos y colorantes. Los compuestos orgánicos de Sn se usan para fabricar plásticos, envases para alimentos, cañerías plásticas, plaguicidas, pinturas y sustancias para repeler animales. El estaño es liberado por actividades como la minería la combustión de petróleo y carbón. (ATSDR, 2005).

Arsénico (As)

El As se clasifica químicamente como un metaloide ya que tiene propiedades tanto del grupo de los metales como de los no metales, tiene un peso atómico de 74.92 uma y se puede encontrar en tres estados de oxidación (3^- , 3^+ , 5^+) (Klaassen, 2008). El As en el ambiente generalmente se encuentra combinado con otros elementos como por ejemplo oxígeno, cloro y azufre y al combinarse con estos elementos se le conoce como As inorgánico, mientras que, combinado con carbono e hidrógeno se conoce como arsénico

² Las neumoconiosis son un grupo de trastornos debidos al depósito de polvo de minerales en el pulmón, denominados inertes, porque no tienen capacidad fibrogenética y no originan sintomatología respiratoria.

³ Es un estado patológico caracterizado por el desarrollo de las características sexuales masculinas en gasterópodos femeninos expuestas a tributil-estaño, un compuesto anti-incrustante utilizado en embarcaciones marinas. Uno de estos caracteres es el desarrollo de un pene o un conducto deferente, el cual puede bloquear el oviducto femenino causando esterilización y, en consecuencia, una disminución de gasterópodos en la zona expuesta (Oehlmann *et al.* 1996; Ostrakhovitch, 2015).

orgánico Éste, presenta una afinidad significativa con el azufre y sus compuestos (Plant *et al.*, 2004).

En ambientes reducidos prevalece el arsénico elemental y la arsina (3^-), el arsenito (3^+) puede ser la forma dominante bajo condiciones moderadamente reducidas y el arseniato (5^+) es la especie predominante en estado de oxidación estable en ambientes oxigenados u oxidantes. Los arsenitos y los arseniatos son altamente solubles en agua. Este metaloide es el veinteavo elemento más abundante de la corteza y se asocia en primera instancia con las rocas ígneas y sedimentarias, presentándose principalmente en forma inorgánica en concentraciones promedio de 2 a 5 mg kg⁻¹. (Peshut *et al.*, 2007).

Los compuestos inorgánicos de As se usan principalmente para preservar madera para que esta no se deteriore o se pudra. Los compuestos orgánicos de As se usan como plaguicidas. (ASTDR, 2007) así como en biocidas (preservadores de madera, rodenticidas), colorantes, fertilizantes, aditivos alimenticios para animales como promotores del crecimiento de aves y cerdos, en pirotecnia y en la industria de municiones (Espinosa, 2012).

El As presenta dos estados de oxidación (As (VI) y As (III)), la solubilidad es afectada por fluctuaciones de estados de oxidación y reducción de los ecosistemas marinos (Sadiq, 1990). El As puede pasar a los lagos, ríos o al agua subterránea disolviéndose en el agua de lluvia o en desagües industriales. Cierta cantidad de As se adherirá a partículas en el agua o a sedimento del fondo de lagos o ríos, mientras que otra porción será arrastrada por el agua. Aunque algunos peces, moluscos y crustáceos incorporan As que puede acumularse en los tejidos, la mayor parte de este As se encuentra en una forma orgánica llamada arsenobetaina (llamada comúnmente arsénico de pez) que es mucho menos peligrosa (ASTR, 2007).

La exposición al As en los seres humanos se asocia con encefalopatías y alteraciones neurológicas como la pérdida de la memoria, la concentración, la comprensión verbal y la atención así como la neuropatía periférica (Rodríguez *et al.*, 2003). Moreno (2011) reportó que en experimentos con ratones, durante la exposición al As, se produce una disminución en la actividad locomotora y alteraciones en otras conductas típicas con dosis superiores a los 10 mgL⁻¹. Si hay una ingesta de As con niveles de entre 300 y 30,000 ppb se puede sufrir irritación en el estómago y los intestinos, así como la reducción de la producción de glóbulos rojos y blancos, lo que puede causar fatiga, ritmo cardíaco anormal, daño de los vasos sanguíneos (lo que produce contusiones) y alteraciones de la función de los nervios (produce una sensación de hormigueo en las manos y los pies). Una exposición prolongada al As se puede desarrollar cáncer de piel y cáncer en el hígado, la vejiga y los pulmones. Así mismo es tóxico para los órganos hematopoyéticos así como a la formación del embrión y cáncer de pulmón. En general, el As inorgánico es más tóxico que el orgánico. Por otra parte, las formas de As que se absorben más rápidamente son más tóxicas, y las que se eliminan con facilidad tienden a ser menos tóxicas. En peces puede producir daños neuromotores como la pérdida del equilibrio, daños en el riñón como fibrosis y lesiones en el hígado (Prieto *et al.*, 2006).

Se han encontrado cantidades bajas de As en alimentos provenientes del mar. Así mismo se han encontrado concentraciones más altas de As inorgánico en los moluscos bivalvos

(almejas, ostras, mejillones) y en crustáceos (cangrejos y langostas). Las formas orgánicas de As que se encuentran en la comida de mar (principalmente la arsenobetaina y la arsenocolina) son consideradas generalmente como no tóxicas, y son excretadas en la orina después de haber sido ingeridas (ATSDR, 2007). El As presenta una afinidad por las partículas sedimentarias; éstas lo atrapan de la columna de agua y eventualmente lo incorporan a la columna sedimentaria de los sistemas acuáticos (Gerrise *et al.*, 1998).

Cromo (Cr)

El Cr es un metal plateado, brillante y maleable (Gauglhofer y Bianchi, 1991). Tiene un número atómico de 24 y presenta un estado de oxidación de 3^+ y 6^+ . Tiene una masa atómica de 51,996 uma.

Es un oligoelemento⁴ químico metálico de transición (grupo B), que no se encuentra comúnmente de forma elemental, es decir, se encuentra presente en la naturaleza sólo en estado combinado y formando compuestos (Villalobos-Pietrini, 1982). El Cr se presenta en muy bajas concentraciones en las rocas y en minerales de la corteza terrestre (Plant y Raiswell, 1983).

En particular, el Cr se emplea en la industria para galvanizar otros metales; el óxido de cromo (III) actúa como pigmento y catalizador; el óxido de cromo (IV), que se caracteriza por ser magnético, se utiliza principalmente en audio y video; los cromatos son usados para la oxidación de compuestos orgánicos, en la industria textil y en la producción de pigmentos. Además, el Cr se usa en las industrias de la construcción, pintura, y del aceite (como corrosivo), en fuegos pirotécnicos, en el tratamiento de agua residual, y en los fertilizantes (Gauglhofer y Bianchi, 1991).

Los efectos biológicos de Cr dependen de su estado de oxidación: Cr (VI) es altamente tóxico para la mayoría de los organismos, mientras que Cr (III) es relativamente inocuo (Wong y Trevors, 1988; Katz y Salem 1993). La toxicidad del Cr (VI) se debe principalmente a su capacidad oxidante, ya que cuando está en contacto con los compuestos orgánicos esenciales de un organismo (reductores) se consumen electrones y puede inhibir un número de procesos metabólicos importantes. Por ejemplo, la síntesis intracelular de ATP, el intercambio de fosfolípidos de las membranas y la reducción de los iones peróxido (De Flora, *et al.*, 1989; Yawata y Tanaka, 1973; Hagenfeldt y Arvidsson, 1978). Los compuestos de cromo VI se disuelven con facilidad, pero en condiciones naturales y en presencia de materia orgánica oxidable, se reduce rápidamente a compuestos de cromo III más estables y menos hidrosolubles que pueden fijarse al sedimento acuático, y difícilmente vuelven a movilizarse, dado que los compuestos de cromo III para formar cromo VI prácticamente no ocurre en forma natural (Rouhi, 1999).

Los efectos tóxicos agudos del Cr (VI) pueden dar lugar a un shock cardiovascular inmediato y efectos posteriores como son lesiones en el riñón, la glándula tiroides, la médula ósea, glándula tiroides, mutaciones en el tracto gastrointestinal así como

⁴ Un oligoelemento es el que se halla en muy bajas cantidades en las células de los seres vivos y es indispensable para el desarrollo normal del metabolismo.

acumulaciones en el hígado, sistema nervioso debido a que la eliminación del Cr dentro del organismo es muy lenta (Barceloux, 1999). Intracelularmente el Cr (III) puede ser secuestrado por grupos fosfato de ADN que afectan a la replicación, la transcripción y causando mutagénesis (Nishio y Uyeki 1985; Bridgewater *et al.*, 1994).

Cadmio (Cd)

El Cd es un metal blanco brillante, dúctil y resistente a la corrosión que es maleable. Es un oligoelemento que puede existir en estado de oxidación 1^+ , pero se encuentra casi exclusivamente en 2^+ de valencia en el entorno natural. El Cd es un elemento raro en la corteza con concentración en la litosfera de 0.08-0.1 ppm y este metal tiende a concentrarse en los minerales sulfúricos (Cullen y Maldonado, 2013). Generalmente, se encuentra como mineral combinado con otros elementos tales el oxígeno (óxido de cadmio CdO), cloro (cloruro de cadmio CdCl₂) o azufre (sulfato de cadmio CdSO₄), (sulfuro de cadmio CdS).

En ambientes dulceacuícolas, está íntimamente asociado con la materia coloidal como CdC₁₂ y CdSO. En el mar el 66% está presente como ion Cd²⁺ junto con CdCO₃, (26%), Cd(OH)₂, (5%), CdC₁₂, (1%) y CdSO₄, (1%) (Whitfield *et al.*, 1981).

El cadmio es liberado al suelo, al agua y al aire durante la extracción y refinación de metales no ferrosos, la manufactura y aplicación de abonos de fosfato, la combustión de combustibles fósiles, y la disposición e incineración de la basura (ATSDR, 2012). La movilización natural de las concentraciones traza en la corteza continental y el manto puede ocurrir a través de erupciones volcánicas, erosión física y química del material de roca madre o suelos derivados, quema de vegetación, brisa marina y la producción de aerosoles biogénicos marinos (Cullen y Maldonado, 2013).

Debido a su similitud con el metal esencial Zn, las plantas absorben el Cd del agua de riego, por esto, el empleo de fertilizantes a base de fosfatos que contienen Cd en forma iónica como contaminante natural, o su presencia en el lecho de ríos y mares contaminados por las descargas industriales aumentan los niveles del elemento en los suelos y, por lo tanto, en las plantas. La concentración de Cd biodisponible aumenta cuando disminuye el pH del suelo, por lo que un efecto indeseable más de la lluvia ácida es el aumento de los niveles de Cd en los alimentos. El depósito húmedo de Cd en aguas saladas y dulces causa un incremento muy grande del metal en todo el mundo.

Los niveles naturales de Cd en el medio marino no representan mayor riesgo para la biota, pero en concentraciones elevadas (15 ppm~ 130 μM) puede tener efectos importantes en peces como en el color de piel (palidez), asfixia, desorientación (nado en zonas superficiales), pérdida de apetito, disminución de niveles de glóbulos rojos y hemoglobina, acumulación en hígado y músculos (Osman *et al.*, 2009).

La exposición en humanos puede ser a través de ingestión de agua y alimentos que contengan el metal, este una vez ingresando al cuerpo, se absorbe y se transporta por la sangre a los diversos órganos y tejidos, principalmente a riñones e hígado, en donde se retienen cerca del 50% del Cd, y a las glándulas salivales, páncreas, músculo y sistema nerviosos central, en muy bajas concentraciones.

Plomo (Pb)

El Pb es un metal blanco azulado de lustre brillante, muy maleable, dúctil y pobre conductor de la electricidad, número atómico 82, peso atómico 207.2 uma. Presenta dos estados de oxidación: Pb (II) (principal en el medio ambiente) y Pb (IV) (Callender, 2004).

En el agua de mar se encuentra como $PbCl_2$ (43%), $PbCO_3$ (42%) y $Pb(OH)_2$ (9%) (Whitfield *et al.*, 1981). Los compuestos inorgánicos de Pb pueden ser de colores brillantes, son ampliamente utilizados como pigmentos en pinturas, tales como el cromato de plomo (amarillo) y óxido de plomo (rojo). El Pb también forma compuestos orgánicos, de los cuales el tetraetil y el tetraetil de plomo se usan comercialmente como aditivos de la gasolina de forma industrial (Hoffman *et al.*, 2007). Puede ser utilizado como metal puro, en aleaciones comúnmente usadas como Pb/Sb para placas de baterías y Pb/Sn usada en soldaduras. Así mismo se ocupa en la producción de soldaduras, tuberías, latas de alimentos, pinturas caseras, municiones, recubrimientos de maquinaria, equipos eléctricos y electrónicos (superconductores, transistores), equipos de vehículos automotores, tanques de almacenamiento de sustancias básicas corrosivas, protecciones contra radiaciones (en nucleoelectricas, laboratorios médicos, computadoras, televisiones, instalaciones militares); en la elaboración de productos cerámicos y de vidrio, cerámicos piezoeléctricos; algunos óxidos de plomo de alta pureza se utilizan en cristales de precisión para equipos de rayos X, rayos láser, lentes de visión nocturna, etcétera (ASTR 2007 y Bodek 1988). También es empleado para la fabricación de recubrimiento de cables, metales para cojinetes, vaciado de metales y tuberías.

No se sabe que el Pb presente ninguna función o requerimiento biológico, por lo que se clasifica como elemento no esencial (Thompson, 1990), sin embargo, es tóxico aún en concentraciones bajas afectando varios órganos y sistemas como el sistema nervioso, hematopoyético, renal, endócrino y esquelético (Goyer, 1997). En los humanos las primeras rutas de absorción del Pb son por respiración e ingestión. Entra en todos los tejidos del cuerpo siguiendo los canales de distribución del calcio. El Pb tiene efectos tóxicos vía el estrés oxidante mediante la peroxidación de los lípidos. En casos severos, la persona afectada puede sufrir psicosis aguda, confusión y disminución de la conciencia y las personas que han sido expuestas por largos periodos de tiempo pueden sufrir deterioro de la memoria, tiempo de reacción prolongado y capacidad reducida de entendimiento (Jurap 2003; Castro-González y Méndez-Armenta, 2008). La vida media del Pb en sangre, en los eritrocitos es de aproximadamente 35 días, mientras que en el cerebro es de 2 años y en el hueso dura por décadas (Roberts *et al.*, 2001).

Níquel (Ni)

El Ni es un metal de color blanco, brillante y ferromagnético, con un peso atómico de 58.71 uma (HHS, 2005), es un oligoelemento. El Ni es un metal de la primera serie de transición con número atómico 28. El Ni se puede encontrar en los estados de oxidación 0, 2^+ , 3^+ e inclusive 4^+ siendo este último el más raro y 2^+ el más común (Ragsdale, 2008). Como metal se encuentra en los meteoritos y en el núcleo de la tierra formando una aleación dura y pesada junto con hierro e iridio. También se encuentra como catión en la niquelina y la

garnierita. En el océano el Ni se encuentra de forma natural pero también proviene de las refineries de petróleo, de la industria de textiles, acero, papel, fertilizantes, pinturas, de desechos urbanos, de minería y depósitos marinos.

Es un micronutriente esencial que juega un papel biológico importante (Hwalla, 2010; Ragsdale, 2008) por ejemplo la producción de glóbulos rojos y el funcionamiento del sistema hepático (Amado, 2007).

En concentraciones elevadas el Ni puede causar efectos tóxicos, daño en diversos sistemas como el respiratorio, cardiovascular, gastrointestinal, hematológico, músculo esquelético, hepático, renal, dérmico, ocular, inmunológico, neurológico y sistema reproductivo. Los efectos tóxicos y carcinogénicos de los compuestos de Ni están asociados con un daño en el DNA, proteínas y la inhibición de defensas celulares antioxidantes (Eisler, 2000). Tanto los compuestos solubles como muy poco solubles del níquel son considerados carcinogénicos por vía pulmonar (OMS, 1995).

Los organismos acuáticos pueden tolerar un amplio rango de concentraciones de Ni, dependiendo dicha tolerancia del organismo en cuestión. En lo que respecta a los animales las concentraciones asociadas a toxicidad aguda varían dentro de un amplio rango: 0,190-435 mg/l para invertebrados y 0,128-98,50 mg/l para vertebrados (Keller y Zam, 1991; Martin y Holdich, 1986; Palawski *et al.*, 1985; Kapur y Yadav, 1982). Por ejemplo, algunos organismos bentónicos como ciertos bivalvos y cangrejos de río pueden bioacumular Ni en mayor medida que los organismos pelágicos (Hutchinson *et al.*, Forester, 1980).

Algunos de los metales con los cuales se combina el Ni son el Fe, Cu, Cr y Zn. Estas aleaciones se usan para fabricar monedas y joyas y en la industria para fabricar artículos tales como válvulas e intercambiadores de calor. La mayor parte del Ni se usa para fabricar acero inoxidable. El Ni también se combina con muchos otros elementos tales como el cloro, azufre y oxígeno para formar compuestos de Ni. El Ni y sus compuestos no tienen ni olor ni sabor característico. Los compuestos de níquel se usan para niquelado, colorear cerámicas, fabricar baterías, y como sustancias conocidas como catalizadores, que aceleran la velocidad de reacciones químicas (ATSDR, 2005).

Screening Quick Reference Tables (SQiRTs)

Los valores de Screening Reference Tables (SQiRTs) (tablas de referencia de visualización rápida) fueron desarrollados para ayudar a evaluar los riesgos potenciales de contaminación en el agua, sedimento, tierra y posibles efectos adversos en las primeras etapas de desarrollo de los organismos que en estas matrices habitan. La NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) los utiliza para identificar los posibles impactos a los recursos costeros y hábitats por desechos peligrosos (NOAA SQiRTs-Buchman, 2008). En el presente trabajo se comparan los valores obtenidos de Cu, Sn, As, Cr, Cd, Pb y Ni con los valores de SQiRTs. Para el tema de sedimentos se considera el valor de TEL⁵

⁵ Los valores de TEL son derivados de pruebas realizadas a través de bioensayos estándar.

(nivel de efecto mínimo) y para el tema de agua se consideran los valores de toxicidad crónica y toxicidad aguda.

ANTECEDENTES

Contaminación y caracterización de la laguna costera de Chelem

Chelem tiene una importante intervención antropogénica debido a la infraestructura urbana que se ha desarrollado. En 1937 se inició la construcción del muelle de Progreso y posteriormente en 1968 se inauguró el puerto de abrigo en Yucalpetén. Esto dio paso a una zona industrial del lado poniente y una zona turística al oriente que también es zona operacional de barcos de pesca. Con el puerto de Yucalpetén se abrió una conexión artificial y permanente con el mar. Se ha aumentado la ocupación urbana en el margen norte de la laguna por la creciente demanda turística. La laguna de Chelem ofrece múltiples servicios ambientales y esto ha provocado que sea inmensamente aprovechada. Sin embargo, esto se ha traducido en procesos de deterioro, como la contaminación puntual o difusa de residuos y metales en agua y sedimento (Tapia-González *et al.*, 2008).

La laguna de Chelem recibe una importante visitación turística y en puerto Progreso, al cual está adyacente, se llevan a cabo importantes actividades marítimas portuarias y pesqueras. Dado que Chelem es una laguna en la cual convergen diversas actividades humanas, se han realizado esfuerzos de investigación para conocer y caracterizar a la zona.

Se ha descrito la trofodinámica de algunas especies, por ejemplo, el pez xlavita (*Lagodon rhomboides*) que es una especie de importancia comercial (Canto-Maza y Vega-Cendejas, 2008), así como la estructura de algunas comunidades y flujos de energía (Hernández, 2002; Vega-Cendejas, 1998; Vega-Cendejas y Arreguin-Sánchez 2001).

Respecto a los sedimentos y a la calidad del agua, Colli (2001) realizó un diagnóstico de la salud ambiental de la laguna de Chelem. Herrera-Silveira (2006) indicó que la laguna de Chelem se encuentra con un nivel de riesgo debido al proceso de eutrofización cultural y la pérdida de los pastos marinos debido a los dragados que constantemente se realizan. También se cuentan con los primeros estudios de hidrocarburos en agua y sedimentos de la laguna de Chelem y Puerto Progreso en donde Valenzuela *et al.*, (2005) indican que los valores obtenidos rebasan constantemente los criterios establecidos para aguas costeras no contaminadas en el golfo de México y el mar Caribe que son de 10 µg/L y 70 µg/g para sedimento respectivamente. Los hidrocarburos en este sentido pueden causar cáncer principalmente en niños por leucemia y causar alteraciones al ADN. Así mismo Chelem presenta altas concentraciones de amonio y fosfato, lo que refleja los impactos de las aguas residuales de la zona urbana circundante y resulta en condiciones meso-eutroficas (Tapia, 2007).

Para los años 2010 y 2011 Uribe (2011) reportó altas concentraciones de metales en sedimento para los mismos 12 puntos de muestreo desarrollados en el presente trabajo. El As y el Cd se encontraban por encima del límite de daño aparente para los organismos

(Buchman, NOAA-SQuiRTs) especialmente en la zona con presencia de asentamientos humanos y en la dársena.

JUSTIFICACIÓN

Chelem es una comunidad costera con relevancia económica y social debido a las actividades que convergen en la laguna como son: la extracción de organismos para autoconsumo y para comercio, actividades marítimo-portuarias importantes para el desarrollo y la existencia de cooperativas que ofrecen servicios ecoturísticos y productos marinos. La laguna sirve como zona de protección, reproducción y alimentación a organismos cuyos ciclos biológicos se llevan a cabo tanto en la laguna como en el mar. (Vega-Cendejas y Canto-Maza, 2008). Además, la laguna de Chelem cuenta con extensiones de manglares los cuales brindan diversos servicios ambientales como protección y conservación de fuentes de agua, protección y conservación de especies y ecosistemas y mitigación de emisiones. En general, las lagunas costeras, ayudan a la regulación climática y son un importante sumidero de dióxido de carbono (Herrera-Silveira, 2006). Una característica importante que tiene esta laguna es que se encuentra aledaña al puerto de Progreso, que es un importante puerto de altura y por tanto un foco turístico de importancia que conlleva una derrama económica para la localidad.

Debido a las diversas actividades que se realizan en la laguna de Chelem, esta se encuentra sometida a presiones antropogénicas tendientes a incrementarse día a día. La principal problemática es la contaminación por residuos sólidos y líquidos de diferente naturaleza, que se manifiesta en múltiples impactos negativos como la concentración de metales en la columna de agua y en los sedimentos. La contaminación con metales es un aspecto importante porque estos elementos se encuentran considerablemente distribuidos y son utilizados en un amplio espectro de aplicaciones industriales y tecnológicas (Breton *et al.*, 2006).

La acumulación de metales en este tipo de ecosistemas causa severos problemas en el ambiente, daños severos en la cadena trófica y en las actividades productivas en general. Estos elementos no son degradados por los microorganismos, las plantas y animales, por lo que se acumulan en los tejidos de todos los seres vivos y en consecuencia pueden ser transportados a grandes distancias del sitio originalmente contaminado (de la Cruz-Landero *et al.*, 2013). En este caso los sedimentos pueden actuar como sumideros y a la vez como una fuente de metales en las zonas costeras por sus propiedades físicas y químicas (Sundararajan y Natesan, 2010). Por lo cual resulta necesario llevar a cabo un monitoreo continuo para identificar las tendencias de concentraciones de metales en el tiempo. Se debe evaluar el papel del ambiente fisicoquímico, geoquímico e hidrológico en sus variaciones espaciales y temporales, para poder identificar las condiciones, zonas y temporadas que representen un mayor riesgo para el sistema y el ser humano. Esta información es necesaria para la generación de acciones que resulten efectivas en el control y disminución de la contaminación por metales.

Área de estudio

Descripción geográfica de la laguna costera de Chelem

La laguna costera de Chelem se ubica en el litoral del golfo de México al norte de la península de Yucatán. Es el sistema costero más cercano de la ciudad de Mérida (35 km). Está localizada entre en el puerto de Progreso, la localidad de Yucalpetén y Chelem. Esta laguna se encuentra en los meridianos 89° 40' y 89° 47' y en los paralelos 21° 16' y 21° 14'. El ancho máximo es de 0.95 km y la longitud es de 14 km². Este es un sistema eurihalino (30-40 de salinidad), es verticalmente homogénea y el rango de marea es alrededor de 0.6 m (micromareal) (Cepeda-Gonzales *et al.*, 2011; Herrera-Silveira *et al.*, 2011).

La laguna presenta una superficie aproximada de 15 km y profundidad de entre 0.5 y 1.5 m y su temperatura media anual se encuentra entre los 24 y 26 °C. Tiene una boca artificial en su parte media donde se ubica el mayor puerto e infraestructura básica para la industria pesquera del Estado.

De acuerdo con la clasificación de Lankford (1977) la laguna costera de Chelem es una barrera arenosa producida por el transporte litoral del tipo III-A.

Clima

En la laguna de Chelem el régimen de lluvias marca el patrón climático: secas (marzo-mayo), lluvias (junio-octubre) y Nortes (noviembre-febrero) y la temporada de huracanes (agosto-septiembre) (Herrera-Silveira, 1998).

La climatología de la zona corresponde a una región tipo seco “B”, con temperatura media anual sobre 25.5°C, con una oscilación térmica menor a 5°C (isotermal) según la clasificación de Koppen (García, 1973).

Vegetación

La vegetación que rodea la laguna de Chelem principalmente son mangle negro (*Avicennia germinans*) y mangle rojo (*Rhizophora mangle*) (Herrera-Silveira *et al.*, 1998) y la vegetación acuática sumergida está compuesta por *H. wrightii*, *Thalassia testudinum* y macroalgas, dominando los grupos de Rodofitas y Clorofitas (Herrera-Silveria *et al.*, 1998; Herrera-Silveira 2006).

Aspectos socioeconómicos generales

Población

La pirámide de población por grupos de edad de acuerdo con los resultados del Censo General de Población y Vivienda del 2010 muestra que el mayor grupo se encuentra en un intervalo de los 10 a los 24 años. La población total en Chelem es de 3,509 habitantes de los cuales 1,532 son hombres y 1,485 son mujeres (INEGI, 2010).

Actividades productivas

Los pobladores tienen como actividades más importantes el comercio y el turismo. Chelem se encuentra justo a un lado de la zona turística de Progreso y donde el 60% de la población económicamente activa se dedica al sector terciario. También existe cierta demanda de servicios de la industria, en particular la construcción, donde poco más del 20% de la población económicamente activa se dedica al sector secundario. Del sector primario, la actividad más importante es la pesca, ya que existe una fuerte demanda de recursos pesqueros para consumo de la población y para el turismo, sin embargo, la pesca suele realizarse en zonas alejadas de Chelem y regresando a este sitio para su comercialización (Cepeda-Gonzales *et al.*, 2011). Existen actividades como la extracción del caracol “chivita” (*Melongena corona bispinosa* y *Melongena melongena*) moluscos comercializados en la comunidad pesquera (Sanchez *et al.*, 2005). Así como de camarones del género *Penaeus*, jaibas del género *Callinectes* y el cangrejo moro (*Menippe mercenaria*). Así mismos existe la Sociedad Cooperativa Pescadores Ribereños de Chelem S. C. de R. L. C. V. que se dedica a la extracción de peces, crustáceos y moluscos principalmente. Así mismo en el área se llevan a cabo actividades marítimo-portuarias e industriales.

Turismo

Chelem atrae a un mayor número de turistas por su mayor cercanía a Mérida, capital de Yucatán. Es una de las localidades que registra el mayor porcentaje de infraestructura turística. En Chelem se lleva a cabo el turismo de segunda residencia, esto quiere decir que, la familia se traslada a la playa y ahí permanece durante un mes o más y los miembros con actividad laboral, que no cuentan con vacaciones tan largas, viajan por las tardes o los fines de semana a reunirse con la familia, este tipo de turismo es de carácter local, centrado en la población urbana de las regiones inmediatas. Desde los mediados de los años noventa amplió su mercado al turismo de la tercera edad proveniente de Canadá y Estados Unidos, principalmente durante el invierno. Es así que Chelem cuenta con el mayor número de viviendas de segunda residencia después de Progreso (García *et al.*, 2011).

También se llevan a cabo actividades ecoturísticas, mismas que son brindadas por la cooperativa “Sociedad Cooperativa Ría Chelem”. Esta cooperativa ofrece servicios de paseos en lancha y tiene como principal atractivo el “ojo de agua”.

Marginación social

El índice de marginación está integrado a partir de nueve indicadores socioeconómicos, que involucran el nivel educativo, vivienda, servicios y bienes económicos. El diseño del índice permite agrupar las entidades federativas en cinco conjuntos claramente diferenciados: marginación muy alta, alta, media, baja y muy baja.

Según los resultados por el II Censo de Población y Vivienda, realizado por el INEGI en 2005 y el Censo de Población y Vivienda del 2010, las poblaciones en general tienen un grado de marginación medio⁶ (SEDESOL, 2013).

Características de la vivienda

Según los resultados del II Censo de Población y Vivienda 2010 a nivel municipal (Municipio de Progreso) el porcentaje de personas que reportó habitar en viviendas sin disponibilidad de servicios básicos fue de 5.9%, lo que significa que las condiciones de vivienda no son las adecuadas para 2,931 personas que ahí habitan. Los porcentajes para Chelem son los siguientes:

El 4.68% son viviendas particulares habitadas sin excusado, el 3.61% de las viviendas particulares habitadas no tienen energía eléctrica, el 6.01% de las viviendas particulares habitadas no cuentan con agua entubada, el 2.88% de las viviendas particulares habitadas tienen piso de tierra y el 22.57% de las viviendas particulares habitadas no disponen de refrigerador (SEDESOL, 2013).

Educación

Según los resultados por el II Censo de Población y Vivienda 2010 para el Municipio de Progreso el 7.25% de la población de 15 años o más es analfabeta y el 30.88% de la población de 15 años o más se encuentra sin primaria completa la condición de rezago educativo afectó a 22.8% de la población, es decir 33,726 personas se encontraban bajo esta condición (SEDESOL, 2013).

⁶ La marginación se asocia a la carencia de oportunidades sociales y a la ausencia de capacidades para adquirirlas o generarlas, pero también a privaciones e inaccesibilidad a bienes y servicios fundamentales para el bienestar (CONAPO, 2011).

HIPÓTESIS

Las concentraciones de Cu, Sn, As, Cr, Cd, Pb y Ni en muestras colectadas de agua y sedimentos de la laguna de Chelem, van a ser variables, moduladas por factores espaciales y temporales.

Se espera que las muestras de agua y sedimento presenten una elevada concentración de metales rebasando criterios de SQuiRTs, indicando daños potenciales a los organismos bentónicos de la laguna de Chelem.

OBJETIVOS

Objetivo general

- Determinar la variación espacio-temporal de Cu, Sn, As, Cr, Cd, Pb y Ni en agua y sedimento, durante un ciclo anual, en la laguna de Chelem, Yucatán y determinar si rebasan criterios de SQuiRTs.

Objetivos particulares

- Determinar la concentración total de metales (Cu, Sn, As, Cr, Cd, Pb y Ni) en lluvias (agosto), Nortes (noviembre) y secas (mayo) en agua y sedimentos de la laguna de Chelem.
- Determinar los parámetros fisicoquímicos (pH, T°, S°/oo, Eh y oxígeno disuelto) *in situ* durante las mismas temporadas de muestreo.
- Establecer si existen diferencias significativas espaciales y temporales de metales en la laguna de Chelem mediante pruebas estadísticas.
- Representar mediante mapas la acumulación de concentraciones de metales durante cada temporada (lluvias, Nortes y secas) y anuales de la laguna de Chelem.

METODOLOGÍA

Selección de los sitios de muestreo

Las actividades económicas que se realizan entorno a la laguna de Chelem representan una de las mayores actividades en la región norte de Yucatán, principalmente por el puerto de Yucalpetén, el astillero con capacidad para embarcaciones de altura y a la zona turística de Progreso. Progreso tiene la mayor densidad poblacional, pero una significativa escasez de servicios básicos tales como recolección de basura y tratamiento de aguas residuales. En este contexto, el esfuerzo de muestreo se dirigió a las zonas donde se identificaron fuentes puntuales de metales y que presentan características hidrodinámicas que favorecen la sedimentación del material particulado suspendido, ya que es en estos sitios es en donde los metales tienden a acumularse (Loring y Rantala, 1992).

Fuentes de contaminación

En campo, se geoposicionaron las potenciales fuentes de metales en una zona de un kilómetro alrededor de la orilla con ayuda de un equipo GPS marca GARMIN 60Cx. Se llevaron a cabo recorridos de campo identificando el tipo de fuente: doméstico, industrial, marítimo-portuario y tiraderos clandestinos de basura.

Sitios y temporalidad de muestreo

Dadas las características del sistema y la probable influencia que las actividades domésticas e industriales pudieran tener en la concentración de metales, se establecieron 12 estaciones de muestreo. Las estaciones 1, 2 y 9 fueron ubicadas en las zonas cercanas al manglar donde se han instalado tiraderos de basura clandestinos, en las estaciones 3, 4, 5 se presenta asentamientos humanos cuyos desagües van directamente a la laguna; en las estaciones 6 y 8 se realizan actividades (marítimo portuarias, principalmente), la estación 7 se estableció cerca de un ojo de agua y en las estaciones 10, 11 y 12 (dársena de Yucalpetén y zonas adyacentes) se realizan actividades industriales (talleres y gasolineras) y portuarias. Las coordenadas geográficas de cada estación fueron ubicadas en la laguna con ayuda de un equipo GPS marca GARMIN modelo Etrex (tabla 1) y la ubicación de los sitios de muestreo se presenta en la figura 1.

Tabla 1. Localización de las estaciones de muestreo de la laguna de Chelem-Progreso, Yucatán.

Estación	Latitud Norte	Longitud Oeste
1	21°14'42.70"	89°47'24.80"
2	21°14'49.8"	89°46'14.8"
3	21°15'5.23"	89°44'58.48"
4	21°15'16.58"	89°44'6.45"
5	21°15'39.29"	89°43'24.18"
6	21°15'46.09"	89°42'32.98"
7	21°15'48.46"	89°42'6.74"
8	21°16'8.48"	89°41'34.65"
9	21°16'27.07"	89°40'59.20"
10	21°16'39.82"	89°42'8.88"
11	21°16'11.08"	89°41'58.01"
12	21°16'33.57"	89°42'21.36"

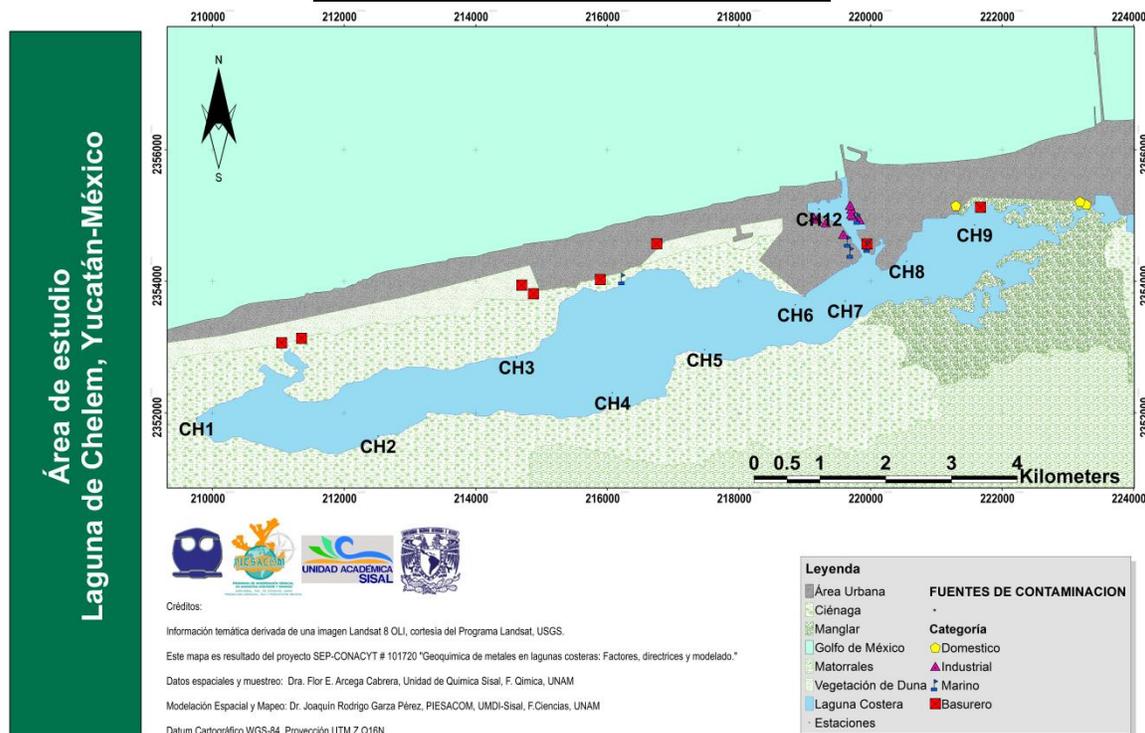


Figura 1. Área de estudio: laguna de Chelem, Yucatán y sitios de muestreo con fuentes de contaminación. Tomado de Arcega-Cabrera *et al.*, 2015.

Se llevaron a cabo tres muestreos que abarcan un ciclo anual de agosto de 2011 a mayo del 2012. Las salidas al campo se programaron de acuerdo con los tres periodos climatológicos predominantes del año en esta zona, lluvias (agosto), Nortes (noviembre) y secas (mayo). Los tres muestreos servirán para determinar los cambios de concentración total de metales, As y características fisicoquímicas y geoquímicas con respecto a las variaciones estacionales.

Colecta de muestras, medición de parámetros fisicoquímicos y almacenamiento.

El acercamiento a los puntos de muestreo se llevó a cabo verificando la posición de la estación de muestreo con el GPS map 76CS x, con una precisión ± 5 m de diámetro y se ancló la embarcación para llevar a cabo la recolecta de las muestras.

El método de colecta de sedimentos fue con una pala con cubierta de teflón, tomando de cada muestra solamente la sección superficial comprendida entre los 0 y 5 cm, la cual se colocó en bolsas plásticas previamente lavadas con ácido nítrico (HNO_3) y ácido clorhídrico (HCl) a 0.1 N y enjuagadas con agua desionizada. La metodología que se siguió fue de acuerdo al establecido por Nigman y Lim (2000) con algunas modificaciones dentro de especificaciones recomendadas por la agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, 2001). Las muestras de sedimentos se secaron por liofilización en una liofilizadora marca Labconco, modelo Freezezone 2.5.

Las muestras para agua se recolectaron superficialmente en botellas de polipropileno de 1000 mL (previamente lavadas con HNO_3 y enjuagadas con agua desionizada) y fueron acidificadas con 5 mL de HNO_3 concentrado (con el fin de evitar el intercambio de iones y precipitación de hidroxilos). Para determinación de sólidos suspendidos (SS) se tomó la muestra de agua superficial en envases de polipropileno de 500 mL de capacidad (previamente lavados con HNO_3 y enjuagados con agua desionizada), de acuerdo con lo propuesto en APHA, AWWA & WPCF (1995).

Las muestras recién colectadas fueron puestas en hielo durante su transporte al laboratorio.

Se midieron los parámetros fisicoquímicos (salinidad, temperatura, oxígeno disuelto, pH y potencial Eh) de la columna de agua a 10 cm de profundidad *in situ* en cada una de las 12 estaciones usando un equipo multi-paramétrico HACH H40d con sondas de conductividad, potencial de óxido reducción (ORP por sus siglas en inglés), temperatura y pH; un equipo YSI 85 Geo Tech para medir del oxígeno disuelto, salinidad y una segunda lectura de temperatura. El sensor de la sonda se hizo descender a la profundidad establecida, asegurando que no quedarán burbujas y se registraron los valores numéricos en una bitácora de campo.

Procedimientos de laboratorio

La fase analítica fue realizada en el laboratorio de Biogeoquímica y Calidad Ambiental de la Unidad de Química-Sisal de la Facultad de Química de la UNAM municipio de Hunucmá, Yucatán, México.

El uso del material empleado en toda el área de química de metales fue exclusivo para los procedimientos y se siguieron las especificaciones de limpieza de acuerdo a la NMX-AA-051-SCFI-2001, donde el material es tratado con ácido nítrico al 10% y enjuagado con agua destilada tipo 1.

Análisis de sedimentos

a) Granulometría

Las muestras fueron liofilizadas y tamizadas siguiendo el método de separación del sedimento de Folk (1974). Se empleó un juego de tamices de la marca Fieldmaster de luz de malla: 2, 0.5, y 0.063 mm, la última fracción se tomó especial cuidado ya que de acuerdo con Rubio y Ure (1993) es la fracción de limos y arcillas menores a 0.063 mm a la cual se adsorben de manera preferencial los metales.

b) Determinación de materia orgánica

Se empleó el método de oxidación húmeda con dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) y titulación con sulfato ferroso ($FeSO_4$) para la determinación de carbón orgánico total (COT) de Walkley con modificaciones de Byers (Walkley & Black, 1934; Byers, *et al.*, 1978). La metodología empleada fue la siguiente:

- 1) Se pesaron 0.5 g de sedimento liofilizado que fue tamizado con luz de malla > 2 mm para remover los materiales gruesos y se tamizó nuevamente con luz de malla = 0.5 mm para homogenizarlo.
- 2) En un matraz Erlenmeyer de 500 mL se agregaron 10 mL de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) 1N y 20 mL de una solución de sulfato de plata (Ag_2SO_4) y ácido sulfúrico (H_2SO_4) concentrado para eliminar la interferencia de los cloruros.
- 3) Se mezcló suavemente y se dejó reposar por 30 minutos y posteriormente se agregaron 200 mL de agua destilada y 10 mL de ácido trioxobórico (H_3PO_4) para eliminar iones férricos.
- 4) Se valoró cada muestra con una solución de $FeSO_4$ 1N acidificado con H_2SO_4 usando como indicador la difenilamina que vira a verde esmeralda como indicador de término de la titulación.
- 5) Para estandarizar el procedimiento se preparó un blanco que lleva el mismo tratamiento pero sin agregar sedimento y a partir de volumen de sulfato ferroso gastado en la titulación se calculó el factor (F) que se empleó para conocer el contenido de carbono orgánico de las muestras.

Los cálculos se realizaron considerando que 1 mL de $K_2Cr_2O_7$ es equivalente a 3 mg de carbono.

$$COT (\%) = \frac{[10 - (V2 * F)] * 0.3}{g \text{ de sedimento}} \quad F = \frac{10}{V1}$$

Dónde:

F= factor del sulfato ferroso

V1= volumen del sulfato ferroso empleado en la titulación del blanco

V2= volumen del sulfato ferroso empleado en la titulación

6) La determinación de carbono orgánico de cada muestra se realizó por duplicado (en el caso de presentar una diferencia igual o mayor a 0.2 mL entre replicas se repitió la determinación).

c) Digestión ácida total de sedimentos asistida con horno de microondas.

La extracción de metales se realizó de acuerdo a los procedimientos de Loring y Rantala (1992) mediante digestión ácida utilizando un horno de microondas (Anton Paar, modelo Synthos 3000) y el método de la Environmental Protection Agency (EPA 3052 MF 100-T16). Este equipo se usa por las ventajas que tiene, como la aceleración de la descomposición y la reducción de riesgos de contaminación de la muestra. El procedimiento utilizado fue el siguiente:

1) Se pesó 0.5g de sedimento fino, menor a 0.5 mm de diámetro, así como el material de referencia⁷ de la NIST (National Institute of Standards and Technology) y se colocaron en tubos de teflón con capacidad de 100 ml para digestión en microondas.

2) A cada muestra se agregó: 9 mL de HNO₃, 1mL de HCl y 3mL de HF. Se realizó el mismo procedimiento para el tubo sensor excepto que, a este no se le agregó HF para evitar que el ácido lo dañe.

3) Se colocaron los tubos de teflón en las chaquetas y se ajustaron las tapas de tal manera que quedaran sellados para evitar escurrimientos en el equipo y se colocaron en el rotor de manera organizada.

4) Se colocó el rotor con muestras en la cámara del horno y se programó para el proceso de digestión.

5) Una vez enfriada la muestra se transfirió a tubos de centrifuga graduados y se aforó a 20 mL con una solución 1 M de H₃BO₃.

d) Determinación de la concentración total de metales por absorción atómica

Para la cuantificación de metales se utilizó un espectrofotómetro de absorción atómica (Perkin Elmer Analyst 800), se trabajó con tres diferentes técnicas: horno de grafito, llama de aire/acetileno y generación de hidruros. Estas técnicas son muy útiles para el análisis de metales en muestras ambientales por su sensibilidad y selectividad. Se utilizaron lámparas específicas; de lumina HCl, para Cu, Cr y Ni y EDL con adaptador electrónico para Sn, As, Cd y Pb.

⁷ El material de referencia ofrece un valor de referencia para la calibración de una técnica analítica.

Horno de grafito

Por la técnica de horno de grafito se cuantificó Sn, Pb y Ni. Esta técnica es muy sensible y es capaz de cuantificar a nivel de ppb. Un gas inerte fluye, exteriormente al tubo de grafito, para evitar la oxidación provocada por las altas temperaturas e interiormente, para desalojar componentes volátiles que se producen. Se empleó la siguiente metodología:

- 1) Se acondicionó el equipo y se verificó que el tubo de grafito estuviera en óptimas condiciones, se calentó la lámpara previamente una hora, se alineo el haz de luz y la punta.
- 2) Se preparó el modificador de matriz, el blanco (HNO_3 al 0.2%) y la disolución más concentrada de la curva de calibración a partir del estándar de Perkin Elmer (el equipo hace las diluciones restantes para la curva de calibración).
- 3) Se colocó en el auto-muestreador el blanco, el modificador de matriz, el stock y las muestras.
- 4) Se obtuvo la curva de calibración para posteriormente leer las muestras y se hizo una recalibración cada 15 lecturas para asegurar la calidad del análisis.

Generación de hidruros

Con esta técnica solo se cuantificó el As porque ya que se incrementa la eficiencia de atomización. Se incrementa su selectividad porque separa al analito⁸ de la matriz por la formación de un compuesto volátil y su límite de detección es de ppb o inferiores. En esta técnica se reduce selectivamente el As pentavalente a trivalente. Se adiciona HCl concentrado a la muestra para favorecer la reducción completa y se agrega permanganato de potasio como indicador ya que este se decolora evidenciando la reducción. Se empleó la siguiente metodología:

- 1) Se preparó la curva de calibración de 0, 5, 10, 15, 20 ppb's en matraces de 50 mL, se adicionó 500 μL de HCl concentrado, 60 μL de KMnO_4 al 5% y al final de aforó con agua destilada a 25 mL.
- 2) Se adicionaron con el siguiente orden: 2 mL de muestra, 250 μL de HCl concentrado, 30 μL KMnO_4 al 5% y se aforó a 25 mL con agua destilada.
- 3) La curva de calibración y las muestras se transfirieron a tubos de centrifuga de 50 mL y 15 mL y después se colocaron en el muestreador automático.

Llama de aire/acetileno

La técnica de llama se utilizó para cuantificar Cu debido a su abundancia en las muestras y la sensibilidad no debe ser tan alta. La metodología que se empleo fue la siguiente:

⁸ El analito es el componente de interés en la muestra.

- 1) se optimizaron los parámetros del equipo como altura del quemador y el flujo de gas para obtener la mayor sensibilidad en el método.
- 2) Las disoluciones se prepararon de acuerdo a la disolución estándar del manual del equipo.
- 3) Después de obtener la curva de calibración en el equipo se leen las muestras y se recalibró cada 25 lecturas.

Análisis de metales en la columna de agua

a) Metales en columna de agua

Material particulado

Las muestras de agua que fueron colectadas en botellas fueron homogenizadas por agitación manual por 1 minuto. Posteriormente, se filtró a través de una membrana de nitrocelulosa previamente pesada y puesta a peso constante. Una vez terminada la filtración, el filtro fue lavado tres veces con agua destilada para eliminar cristalización de sales.

El material particulado es la porción de sólido remanente en la membrana. Una vez perfectamente seco, este material junto con el filtro fue digerido con la misma metodología empleada para la digestión total de los sedimentos para su análisis EAA,⁹ utilizando el método particular para cada elemento medio (THGA, FIAS Y Flama)¹⁰. Los blancos de cada corrida, fueron digeridos con un filtro de nitrocelulosa limpio además de los reactivos empleados.

Metales disueltos

Para la obtención de metales disueltos se tomaron 30 mL del líquido difundido, al cual se adicionó 2 mL HNO₃ concentrado para acidificar la muestra y asegurarse de esta manera que los metales se encontraran en disolución y no precipitados y/o adsorbidos a las paredes del recipiente. Se hicieron las determinaciones analíticas por separado, pero finalmente fueron sumadas las concentraciones medidas en metales particulados y metales disueltos.

Los resultados fueron entonces tomados como total de metales en agua.

b) Sólidos Suspendedos Totales y Materia Orgánica en agua

⁹ EAA: espectro de absorción atómica.

¹⁰ TGHA: espectro de absorción atómica con horno de grafito; FIAS: espectro de absorción atómica con vapor frío y generación de hidruros.

Las muestras de 1L fueron filtradas con un filtro de fibra de vidrio con poro de 0.045 mm (Whatman grado 934AH) previamente pesado, lavado con HNO₃ al 1% y enjuagado con agua tipo 1¹¹ antes de utilizarse. Las muestras fueron destinadas para obtener Sólidos Suspendidos Totales (SST) de acuerdo a la NMX-AA.034SCFI-2001 se reportan en mg L⁻¹ y % de materia orgánica en SST en agua se puede obtener por diferencia de peso, al calcinar la membrana en una mufla a 600°C por 20 minutos.

Análisis estadístico

Para determinar si existen diferencias significativas temporales y espaciales de los parámetros fisicoquímicos (profundidad, salinidad, T°, OD, pH, potencial Eh, SS, %OMSS y %MO) y de los elementos (Cu, Sn, As, Cr, Cd, Pb y Ni) se utilizó la técnica estadística de Análisis de Varianza (ANOVA), se probaron los supuestos de normalidad utilizando Shapiro-Wilk y de homocedasticidad con la prueba de Levene (Zar, 2010). Para los datos que no cumplieron con los supuestos de ANOVA se les realizó la prueba de no-paramétrica de Kruskal-Wallis. Las comparaciones múltiples se realizaron con la prueba de Tukey (Zar, 2010).

Todos los análisis estadísticos se realizaron en el programa STATISTICA versión 10.

¹¹ El agua tipo 1 es desionizada, tratada con oxidación de UV y pasada por un filtro de 0.2 micras con una resistividad de 18.2 Ohms.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Parámetros fisicoquímicos

Profundidad

La profundidad no presentó diferencias significativas temporales. Espacialmente se presentaron diferencias significativas entre las estaciones 1-11 y 7-11 (tabla 2). Esta diferencia significativa es porque la estación 11 es más profunda mientras que las estaciones 1 y 7 son las estaciones más someras.

En la distribución de frecuencias para la profundidad (figura 2) se observa un comportamiento bimodal. Las estaciones 1 a 7 son someras y de 8 a 12, las profundidades son mayores. Esto es por una separación física dada por la presencia del puente de conexión entre Progreso y Yucalpetén (Arcega-Cabrera *et al.*, 2015 y Uribe, 2011). En general, se puede observar que la profundidad aumenta en la temporada de secas exceptuando las estaciones 7, 10 y 11. Este comportamiento es inverso al esperado, ya que en secas se espera que exista una mayor evaporación y por ende disminuya el espesor de la columna de agua. Así también, se espera que haya un incremento de la columna sedimentaria por asentamiento de las partículas en suspensión. Sin embargo esto no se observa más que para las estaciones 7, 10 y 11, en el resto de la laguna es probable que se esté observando el aporte extemporáneo del agua del acuífero generado por lluvias en abril de 2012 (promedio de 41 mm-FIUADY CM), sin embargo, se requeriría una serie de tiempo a más largo plazo, para determinar si es este un comportamiento que define un patrón en la laguna.

Profundidad			
Variación	Prueba	Valor de P	Comparaciones múltiples
Espacial	Kruskal-Wallis	0.1000	CH1-CH11, CH7-CH11
Temporal	Kruskal-Wallis	0.0083	-

Tabla 2. Análisis de la variación espacial y temporal de la profundidad de la laguna de Chelem, pruebas de Kruskal-Wallis.



Figura 2. Variación espacio-temporal de la profundidad de la laguna de Chelem.

Salinidad

La salinidad presentó temporalmente una diferencia significativa entre LI-S debido a que existe un aumento en la salinidad en la laguna de Chelem en la temporada de secas debido a la alta evaporación del agua, en la temporada de lluvias hay una disminución de la salinidad debido al agua que se aporta a la laguna por la precipitación pluvial. Espacialmente, no existieron diferencias significativas de la salinidad (tabla 3).

Hay casos puntuales en que la estación 8 y 9 no siguen esta tendencia ya que la mayor salinidad se registró en la temporada de Nortes. Este cambio probablemente se deba a que los vientos no permiten la circulación del agua y lo cual provoque un mayor tiempo de residencia del agua (Arcega-Cabrera *et al.*, 2015). En términos generales, siendo mayor en la parte interna de la laguna (estaciones 1-5) relacionada con un incremento en la tasa de evaporación. En la zona de la boca (estaciones 7-12) el cambio en salinidad es menor (1UPS en promedio) probablemente debido a los aportes de lluvias de abril previamente discutidos.

Salinidad			
Variación	Prueba	Valor de P	Comparaciones múltiples
Espacial	Kruskal-Wallis	0.1983	-
Temporal	Kruskal-Wallis	0.0131	LI-S

Tabla 3. Análisis de la variación espacial y temporal de la salinidad de la laguna de Chelem, pruebas de Kruskal-Wallis.

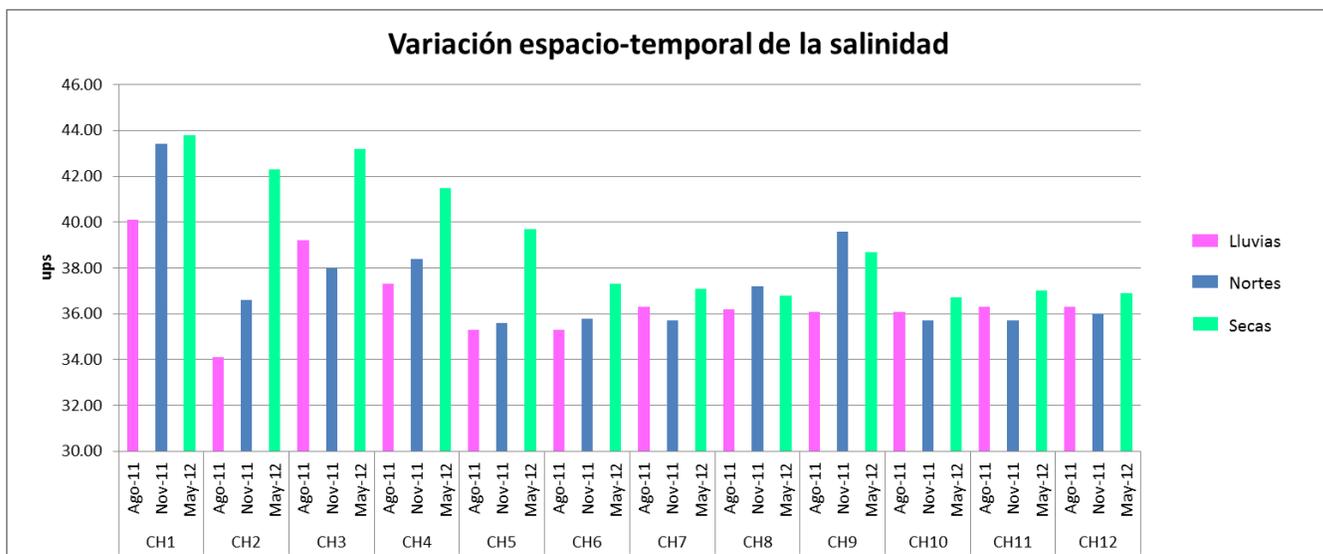


Figura 3. Variación espacio-temporal de la salinidad del agua de la laguna de Chelem.

Temperatura

La temperatura presentó diferencias significativas entre las temporadas LI-N y N-S. Se obtuvieron los valores más bajos de temperatura en la temporada de Nortes y los más altos en las temporadas de lluvias y secas. Espacialmente no se mostraron diferencias significativas de la temperatura en la laguna (tabla 4).

En la figura 4 se puede observar que hay una disminución de la temperatura durante la temporada de Nortes y las mayores temperaturas se registraron en la temporada de secas. La disminución de la temperatura en Nortes se debe a que este fenómeno climático es resultado de la acumulación de aire frío en latitudes medias e intensos gradientes meridionales de presión en la tropósfera baja, que resultan en irrupciones de aire frío hacia los trópicos (Hastenrath, 1991).

Temperatura			
Variación	Prueba	Valor de P	Comparaciones múltiples
Espacial	Kruskal-Wallis	0.8254	-
Temporal	Kruskal-Wallis	0.0009	LI-N, N-S

Tabla 4. Análisis de la variación espacial y temporal de la temperatura de la laguna de Chelem, pruebas de Kruskal-Wallis.

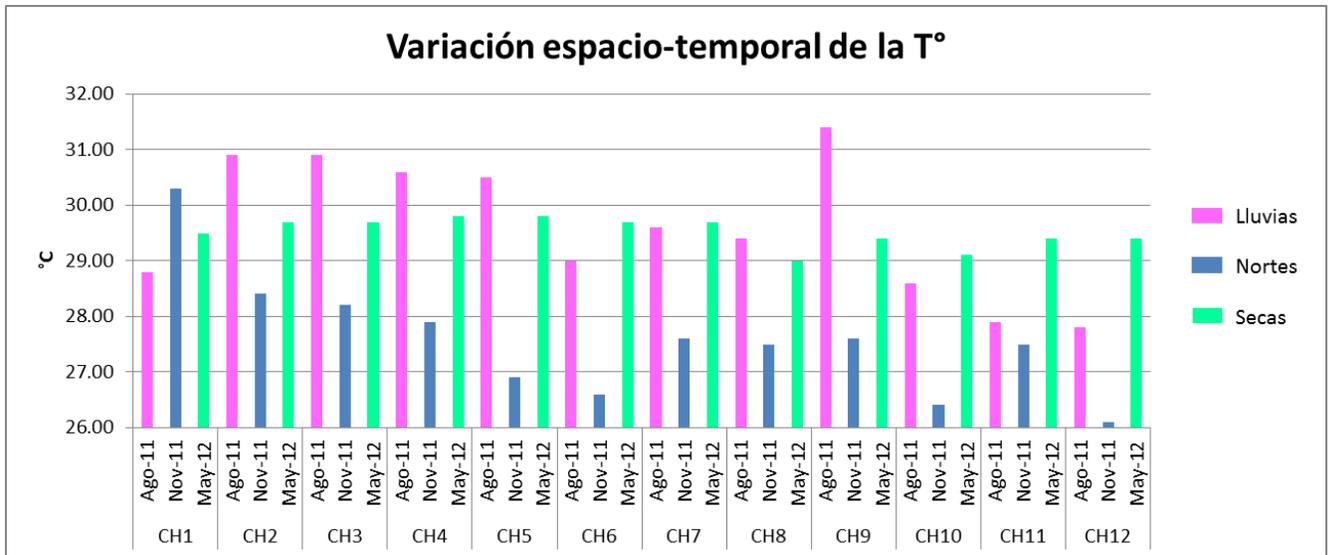


Figura 4. Variación espacio-temporal de la temperatura del agua de la laguna de Chelem.

Oxígeno disuelto (OD)

El OD no presenta diferencias significativas temporales ni espaciales (tabla 5).

En la figura 5 se puede observar que el OD para las estaciones 1, 4, 10 y 11 son las estaciones que menor cantidad de OD presentaron. Esto es debido a la oxidación del material orgánico proveniente del decaimiento de algas y pastos marinos, que provoca una elevada demanda de oxígeno. Para la temporada de lluvias en la estación 1 se puede observar una condición casi anóxica, en esta zona, se desarrolla una biomasa de pastos y algas que incluso dificulta el acceso a la misma. La biomasa que decae durante la temporada de secas dejando tras de sí sedimentos anóxicos y reductores. Al inicio de la temporada de lluvias, estas condiciones anóxicas y reductoras prevalecen hasta que el sistema modifica su dinámica, influenciado por las condiciones características de las temporadas de Nortes y secas.

En las estaciones 4 y 5, la concentración de OD es baja (2.94 3.53 mgL^{-1} respectivamente) en la temporada de lluvias, en las estaciones 6, 7 y 8 la concentración de oxígeno disuelto también es baja (4.05 , 4.60 y 4.36 mgL^{-1} respectivamente) en la temporada de secas y finalmente en las estaciones 9, 10, 11 y 12 en la temporada de Nortes existe una concentración menor (3.53 , 3.04 , 4.12 y 2.21 mgL^{-1} respectivamente) de OD. El OD es afectado por una serie de factores como el fotoperiodo (horas luz), variación diurna, productores primarios y materia orgánica e hidrodinámica del sistema entre otros (Ríos, 2008). La cantidad de oxígeno disuelto también varía en función de la temperatura del agua, a temperaturas muy elevadas existe una baja concentración de OD. Así mismo, la salinidad o la presión atmosférica también intervienen en los niveles de OD (Bairt, 2001). La laguna solo presenta una zona anóxica (estación 1) y en los demás sitios en columna de

agua no presenta zonas anóxicas, esto puede tener una gran repercusión en la permanencia de los metales en suspensión, ya que en presencia de oxígeno tenderán a estar oxidados y a depositarse en los sedimentos (Arcega-Cabrera *et al.*, 2015).

El OD puede utilizarse como indicador de la calidad del agua, y zonas con una concentración menor a 2 mg L⁻¹, son consideradas hipóxicas (aquellas donde los organismos pueden verse afectados). Para la laguna de Chelem, sólo las condiciones del sitio 1 en lluvias representan un riesgo para los organismos (Arcega-Cabrera *et al.*, 2014).

Oxígeno disuelto			
Variación	Prueba	Valor de P	Comparaciones múltiples
Espacial	Kruskal-Wallis	0.1983	-
Temporal	Kruskal-Wallis	0.7165	-

Tabla 5. Análisis de la variación espacial y temporal del oxígeno disuelto de la laguna de Chelem, pruebas de Kruskal-Wallis.

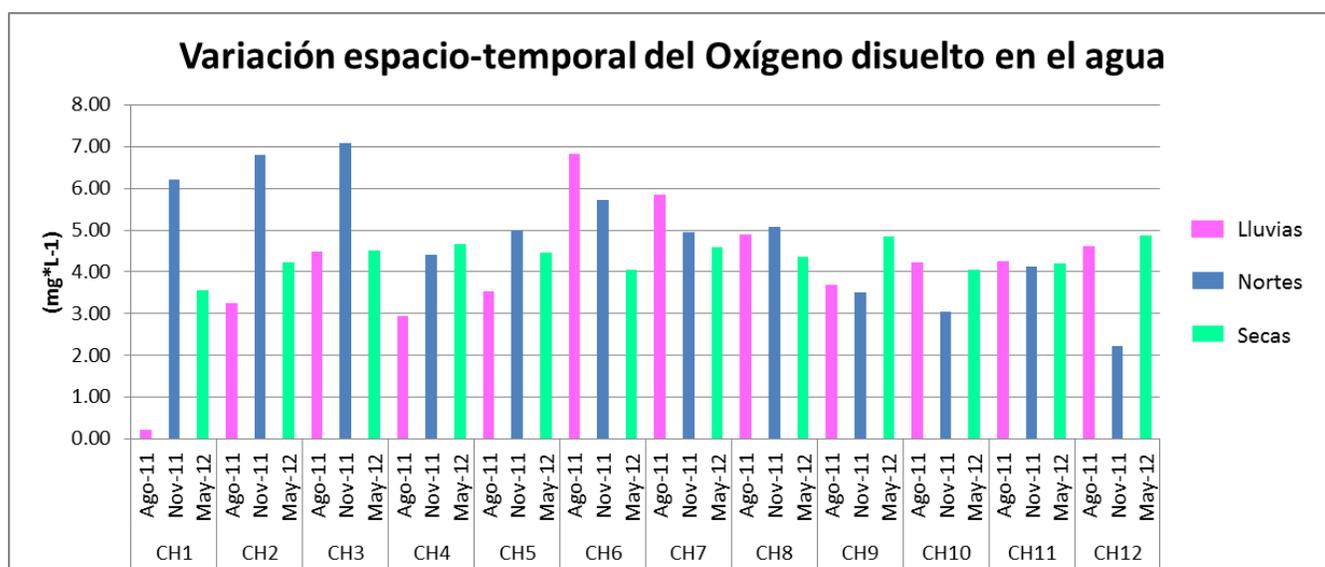


Figura 5. Variación espacio-temporal del oxígeno disuelto en el agua de la laguna de Chelem.

pH

Los valores de pH mostraron diferencias significativas en las temporadas de LI-N y N-S, mientras que espacialmente no hubo diferencias significativas espaciales (tabla 6).

En la figura 7 se puede observar que el pH es mayor durante la época de Nortes para toda la laguna. Esto puede estar relacionado con la entrada de agua al acuífero la cual contiene una gran cantidad de carbonatos en suspensión y solución, que afectan el pH haciéndolo más básico (Salomons y Stigliani, 1995).

El pH afecta a la especiación química y a la movilidad de muchos metales, y los cambios de pH influyen fuertemente en la toxicidad. La mayoría de los metales tienden a estar más disponibles en un pH ácido. Por lo anterior, es probable que los metales en Chelem se encuentren en su mayoría en estado oxidado, formando fases sólidas orgánicas o inorgánicas. El decremento del pH tiene dos efectos: 1) induce la disolución de compuestos metal-carbonato y 2) aumenta la solubilidad de los metales. El decremento del pH puede ligarse directamente a la serie de fenómenos fisicoquímicos que derivan de la oxidación de especies sulfuradas (Brown, 1994). En la estación 9 (temporada de secas) se puede observar que disminuye considerablemente el pH, pero aún así, en la laguna no se registró pH ácido porque los carbonatos aportados por el agua del acífero funcionan como sistema amortiguador del pH.

pH			
Variación	Prueba	Valor de P	Comparaciones múltiples
Espacial	Kruskal-Wallis	0.8254	-
Temporal	Kruskal-Wallis	0.0001	LI-N, N-S

Tabla 6. Análisis de la variación espacial y temporal del pH de la laguna de Chelem, pruebas de Kruskal-Wallis.

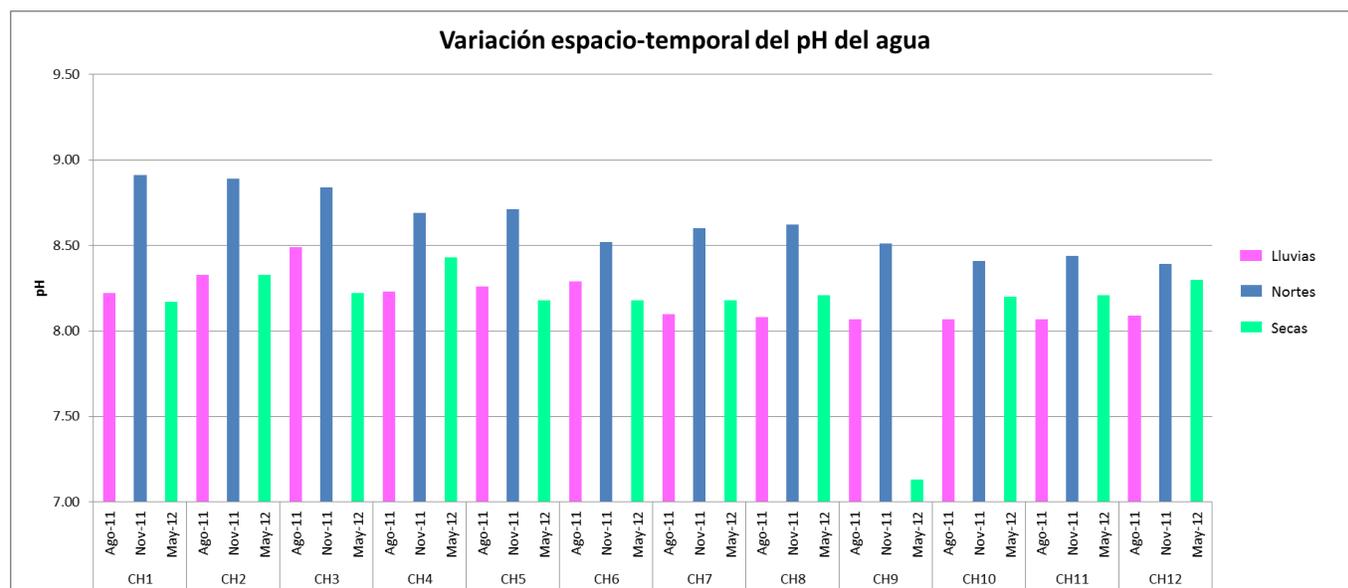


Figura 6. Variación espacio-temporal del pH del agua de la laguna de Chelem.

Potencial Eh del agua

El potencial Eh en la laguna presentó diferencias significativas entre todas las temporadas climáticas (Nortes, lluvias y secas), aunque no espacialmente (tabla 7).

En la figura 7 se puede observar que en la temporada de lluvias el potencial Eh aumenta mientras que para la temporada de Nortes y secas disminuye para todo el sistema. Siendo el Eh el parámetro que nos permite identificar condiciones reductoras y oxidantes en un sistema, tenemos entonces que en Nortes se presentan condiciones netamente reductoras en el agua de la laguna. Estas, probablemente relacionadas con la entrada de agua del acuífero que al ser agua en la que se lleva a cabo la reducción de la materia orgánica, generalmente tiene Eh reductores. En lluvias el valor Eh positivo está indicando que es un ambiente que favorece las reacciones de oxidación. En secas, al disminuir el aporte de agua del acuífero las condiciones tienden a regresar al estado original oxidante. La reactividad, solubilidad y movilidad cíclica de elementos esenciales para los sistemas biológicos son afectadas por el potencial rédox (Martínez *et al.*, 2005). Un

Eh			
Variación	Prueba	Valor de P	Comparaciones múltiples
Espacial	Kruskal-Wallis	0.9699	-
Temporal	Kruskal-Wallis	0.0000	Diferencias entre todas

Tabla 7. Análisis de la variación espacial y temporal del Eh de la laguna de Chelem, pruebas de Kruskal-Wallis.

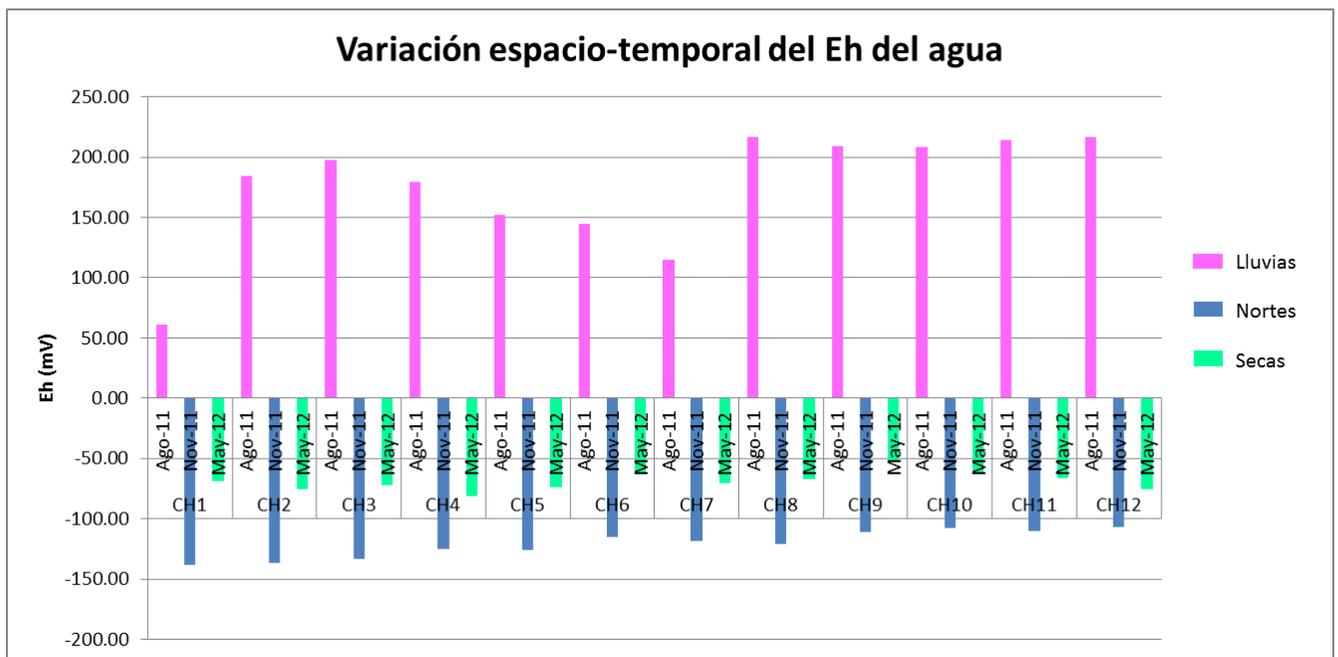


Figura 7. Variación espacio-temporal del potencial Eh en el agua de la laguna de Chelem.

Sólidos suspendidos (SS)

La concentración de sólidos suspendidos presentó diferencias significativas entre las tres temporadas (Nortes, lluvias y secas), mientras que espacialmente no se muestran diferencias significativas (tabla 8).

En la figura 8 se puede observar que, para todo el sistema, durante la temporada de secas, se presentan los valores más elevados de SS, probablemente relacionados con 1) procesos de concentración de partículas debido a la alta tasa de evaporación; 2) mayor cantidad de partículas debido a la descomposición de la materia orgánica presente (materia disgregada en suspensión o formando coloides con los taninos presentes) y 3) perturbación de la columna sedimentaria por acción eólica o antrópica que pone en resuspensión el material fino. Para la temporada de lluvias se presentan los valores más bajos de SS probablemente por el aporte de agua por lluvias.

Es probable que los SS estén integrados en mayor medida por microorganismos que se desarrollan rápida y abundantemente tras los aportes de nutrientes por el agua del acuífero. Sin embargo, para poder confirmar esto se requeriría llevar a cabo la medición de nutrientes y la cuantificación de fito y zooplancton en la columna de agua.

SS			
Variación	Prueba	Valor de P	Comparaciones múltiples
Espacial	Anova de una vía	0.341735	-
Temporal	Anova de una vía	0.000046	Diferencias entre todas

Tabla 8. Análisis de la variación espacial y temporal de SS de la laguna de Chelem, pruebas de Kruskal-Wallis.

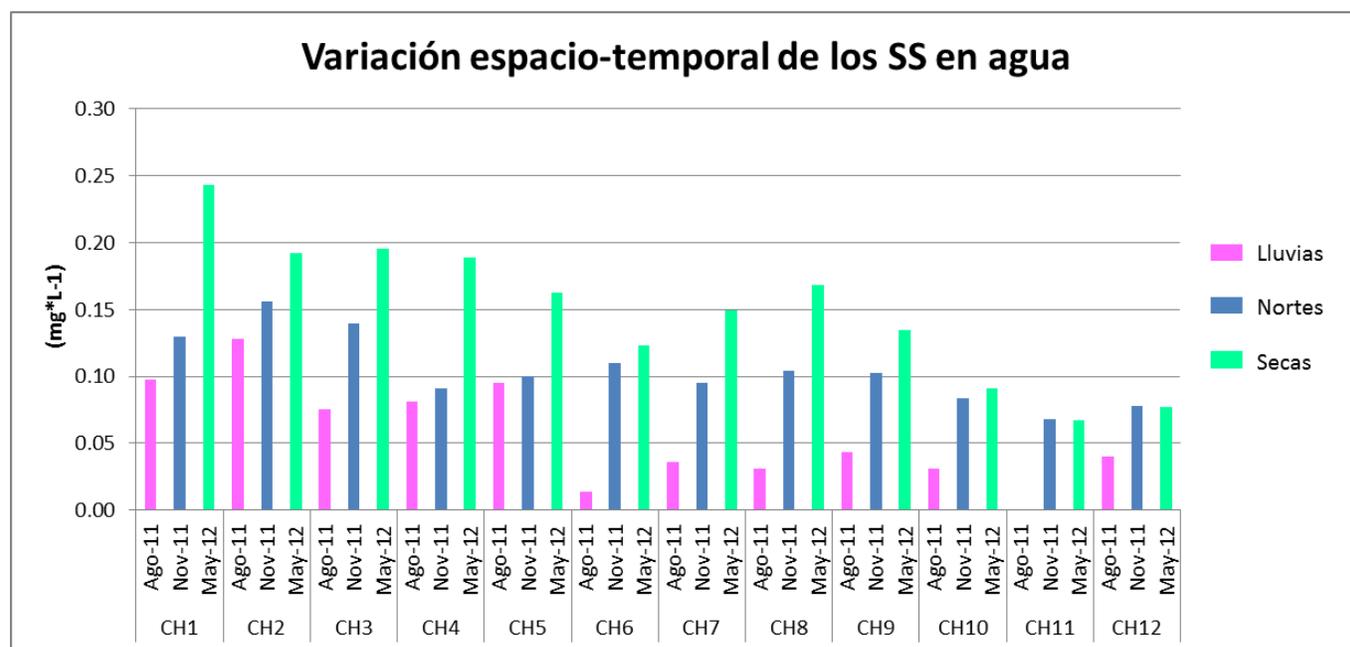


Figura 8. Variación espacio-temporal de los sólidos suspendidos en agua de la laguna de Chelem.

%OMSS

El %OMSS no mostró diferencias significativas tanto temporales como espaciales (tabla 9).

Los sólidos suspendidos son un importante medio de transporte de los metales adsorbidos a ellos, principalmente a la fase orgánica (Al-Ghadban *et al.*, 1994). En la laguna Chelem observamos que la cantidad de materia orgánica en suspensión es muy variable y no hay un patrón o tendencia a nivel lagunar. En algunos sitios casi no hay variación a lo largo del año (9 y 10), en otros, la temporada de mayor contenido de OMSS, es la de lluvias (1, 5, 6 y 12), y otros en secas (2 y 4). Este comportamiento puede estar relacionado con las características hidrodinámicas de cada sitio, las cuales afectan los procesos de resuspensión de material fino y de sedimentación de material suspendido. Sin embargo, tomando en cuenta el patrón temporal de los SS entonces también es probable que los aportes altos de materia orgánica en secas estén representados por microorganismos presentes en la columna de agua como fitoplancton y zooplancton (figura 9).

%OMSS			
Variación	Prueba	Valor de P	Comparaciones múltiples
Espacial	Kruskal-Wallis	0.4449	-
Temporal	Kruskal-Wallis	0.1413	-

Tabla 9. Análisis de la variación espacial y temporal de %OMSS de la laguna de Chelem, pruebas de Kruskal-Wallis.

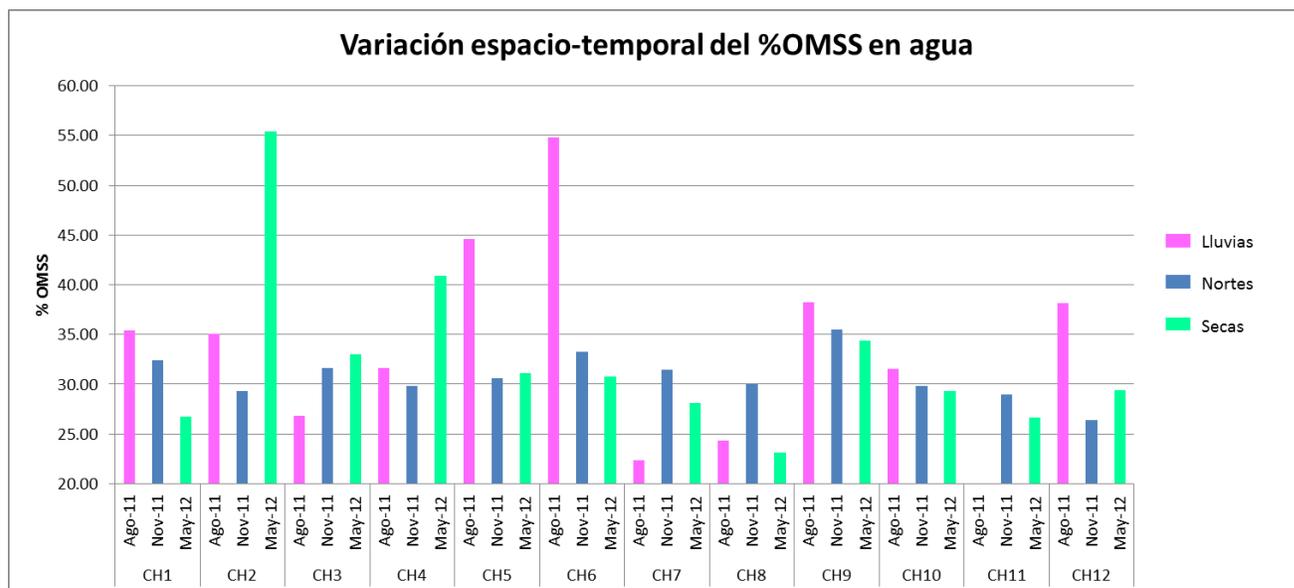


Figura 9. Variación espacio-temporal del porcentaje de materia orgánica sólidos suspendidos de la laguna de Chelem.

%MO

El %MO en la laguna no presenta diferencias significativas temporales aunque si espaciales entre las estaciones 11-12 (tabla 10).

El sedimento lagunar funciona como concentrador de elementos y compuestos, principalmente con base en la cantidad de materia orgánica que contenga. Por ende, un sedimento con mayor contenido de materia orgánica se espera presente también una mayor concentración de metales (Kennish, 1986). Un sistema se considera rico en materia orgánica si su concentración es mayor a 5%. La estación 11 en temporada de secas rebasa el valor de 5%.

En la figura 10, para todo el sistema, el %MO es mayor en la temporada de secas. Esto puede deberse a: 1) la disminución del flujo de la laguna que favorece la sedimentación del material particulado suspendido, 2) al incremento de la microbiota bentónica y 3) al incremento del material orgánico por decaimiento de biota bentónica y pelágica sedimentada. Cualquiera que sea el proceso, los sedimentos de la laguna de Chelem pueden estar funcionando como concentradores de metales ya que los metales puede estar siendo adsorbidos por los sitios activos de la materia orgánica (Arcega-Cabrera *et al.*, 2015)

%MO			
Variación	Prueba	Valor de P	Comparaciones múltiples
Espacial	Kruskal-Wallis	0.0272	CH11-CH12
Temporal	Kruskal-Wallis	0.0474	-

Tabla 10. Análisis de la variación espacial y temporal de %MO de la laguna de Chelem, pruebas de Kruskal-Wallis.

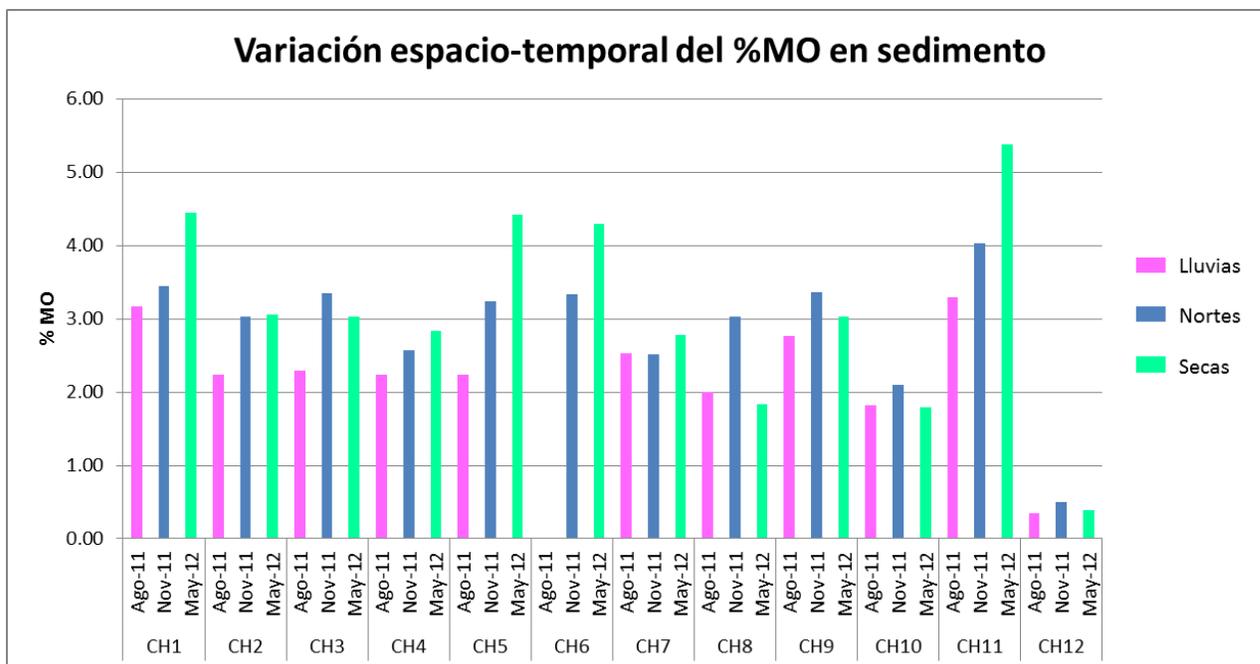


Figura 10. Variación espacio-temporal del porcentaje de materia orgánica en sedimento de la laguna de Chelem.

Metales y As

Plomo (Pb)

La concentración de Pb en sedimento no mostró diferencias significativas entre las temporadas. La mayoría de los sitios de muestreo en la temporada de Nortes presenta las concentraciones más bajas, seguido de la temporada de secas. Así mismo, en la mayoría de las estaciones, se presenta una mayor concentración de Pb en la temporada de lluvias. Especialmente, las estaciones 2, 3 y 4 presentan diferencias significativas con las estaciones 6 y 10 (tabla 11).

Las concentraciones registradas de Pb en el sedimento superficial se encuentran muy por debajo del valor recomendado de SQiRTs ($30.24 \mu\text{g g}^{-1}$) (Buchman, 2008), por ende, el Pb presente en sedimentos de la laguna de Chelem no constituye una amenaza potencial para los organismos bentónicos.

Las estaciones que menos están aportando Pb son en donde están ubicados los tiraderos clandestinos (estación 2) y los asentamientos humanos cuyos desagües van directo a la laguna (estaciones 3 y 4). Las estaciones que más Pb están aportando a la laguna son en donde se llevan a cabo las actividades marítimo-portuarias (estaciones 6 y 10), principalmente la estación 10 es la que presentó la mayor concentración de Pb en sedimento (temporada de lluvias y secas). La presencia de Pb en el sedimento de la laguna de Chelem

es aportado principalmente las actividades más importantes que se realizan aledañas a la laguna (marítimo-portuarias), por lo que en eventos de forzamiento mayor como huracanes podrían resuspenderlo y transportarlo a lo largo de la laguna, pudiendo estar biodisponible y generando así un riesgo para la biota.

Tabla 11. Variación espacial y temporal de Pb en sedimento de la laguna de Chelem, pruebas de ANOVA de una vía.

Pb sedimento			
Variación	Prueba	Valor de P	Comparaciones múltiples
Temporal	ANOVA de una vía	0.854123	-
Espacial	ANOVA de una vía	0.000641	CH2-CH6, CH2-CH10, CH3-CH6, CH3-CH10, CH4-CH6, CH4-CH10

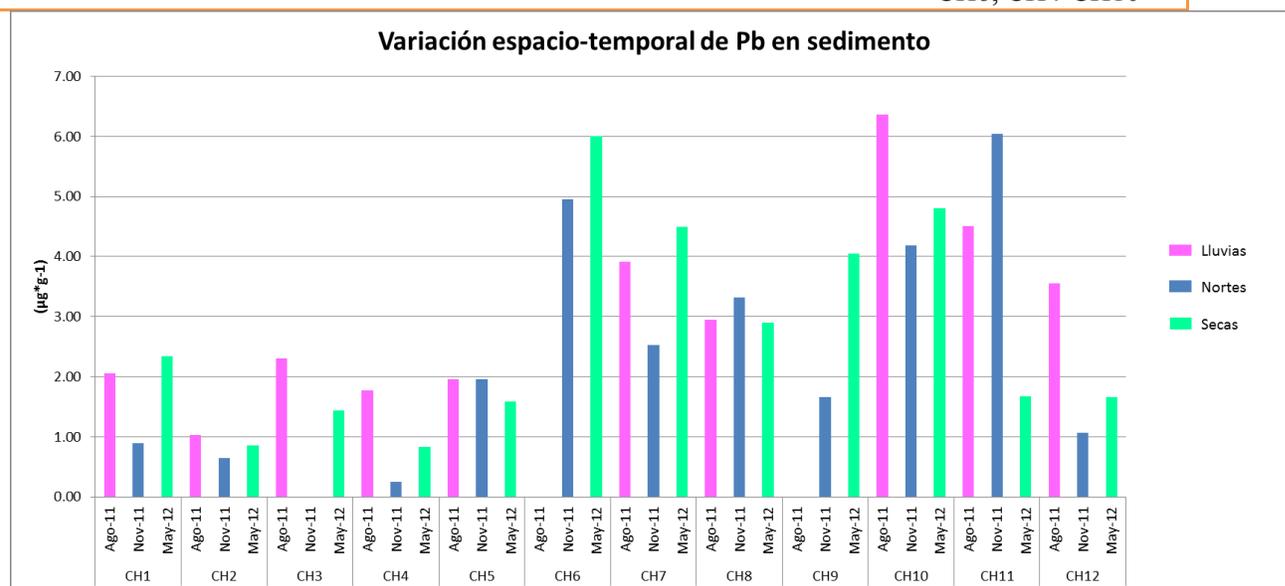


Figura 11. Concentraciones de Pb obtenidas en sedimento superficial de la laguna de Chelem (TEL Pb=30.24 µg g⁻¹).

Se presentaron diferencias significativas entre las tres temporadas para el Pb en agua. Es muy evidente que la temporada que reportó mayor concentración de Pb fue la de Nortes. En la temporada de lluvias se tienen registros de Pb de muy bajas concentraciones que van desde 0.16 hasta 18.26 µg L⁻¹, mientras que para la temporada de secas para toda la laguna, se registraron concentraciones por debajo del límite de detección. En el caso de la variación espacial de las concentraciones de Pb, no existen diferencias significativas entre los sitios (tabla 12).

Los valores registrados de toxicidad aguda en Pb se encuentran debajo del valor recomendado de 210 µg L⁻¹ (Buchman, 2008), excepto la estación 6, que para la temporada

de Nortes se obtuvo un valor de más del doble del valor recomendado. Esto puede estar relacionado con descargas directas, y como se verá más adelante, en este mismo sitio para la misma temporada, se presentan los valores mayores de Cd, Ni y As. Probablemente esto se deba a aportes de agua del acuífero, sin embargo se requiere un estudio más detallado, quizá utilizando otras herramientas analíticas como isotopía para poder identificar el origen de esta agua y de su contenido de metales. La estación 6 puede estar presentando este alto valor debido a los desagües y a las actividades marítimo-portuarias que están ejerciendo una fuerte presión para este sitio en particular ya que también en sedimento se obtuvo que también este sitio es el segundo con más concentración de Pb en sedimento de la laguna. La temporada de Nortes puede estar influyendo en la resuspensión de Pb en la columna de agua

Para el caso de la toxicidad crónica, en la temporada de Nortes todos los sitios rebasan el valor de $8.1 \mu\text{g L}^{-1}$ (Buchman, 2008), y para la temporada de lluvias solo las estaciones 1 y 4 rebasan el valor anteriormente mencionado. La mayor concentración de Pb en la temporada de nortes puede deberse a la resuspensión del Pb hacia la columna de agua (figura 12).

Tabla 12. Variación espacial y temporal de Pb en agua de la laguna de Chelem, pruebas de Kruskal-Wallis.

Pb agua			
Variación	Prueba	Valor de P	Comparaciones múltiples
Temporal	Kruskal-Wallis	0.0	Diferencias entre todas
Espacial	Kruskal-Wallis	0.96	-

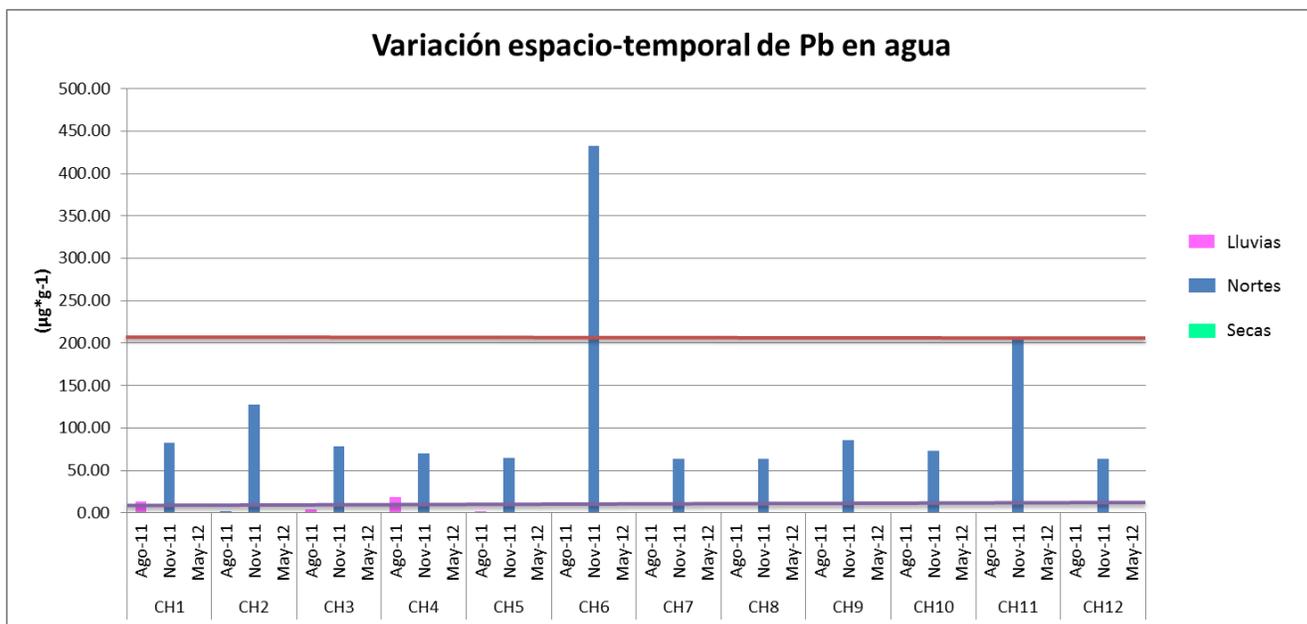


Figura 12. Concentración total de Pb en agua de la laguna de Chelem (Toxicidad Aguda: 210 µg L⁻¹, línea roja; toxicidad crónica, 8.1 µg L⁻¹, línea morada; Screening Quick Reference Tables).

Cadmio (Cd)

Las concentraciones de Cd en sedimento no presentaron diferencias significativas temporalmente. Espacialmente presentó diferencias entre CH3-CH5, CH3-CH5 y CH4-CH5 (tabla 13). Estos sitios son los que corresponden a los desagües directos.

Predominantemente en la temporada de lluvias es donde se obtuvieron valores que rebasan el valor recomendado de 0.680 µg g⁻¹ (Buchman, 2008) que puede estar indicando posibles daños a los organismos bentónicos.

En la figura 13 se puede observar que desde la estación 6 a la estación 11 presentan concentraciones superiores a 0.680 µg g⁻¹ que puede estar indicando un daño aparente. Por ende, los sedimentos de esta zona pueden ser de riesgo para los organismos bentónicos que los habitan o se alimentan en ellos, especialmente para huevos y larvas (Buchman, 2008).

La aportación de Cd probablemente se deba a los desagües que desembocan directo a la laguna como residuos de pinturas y pigmentos que contienen Cd los cuales son resultado del sandblasteo de los barcos. Una fuente importante de Cd para la laguna son los desagües y las actividades marítimo-portuarias.

Cd sedimento			
Variación	Prueba	Valor de P	Comparaciones múltiples
Espacial	ANOVA de una vía	0.006	CH3-CH5, CH3-CH9, CH4-CH5,
Temporal	ANOVA de una vía	0.270	-

Tabla 13. Variación espacial y temporal de Cd en sedimento de la laguna de Chelem, pruebas de ANOVA de una vía.

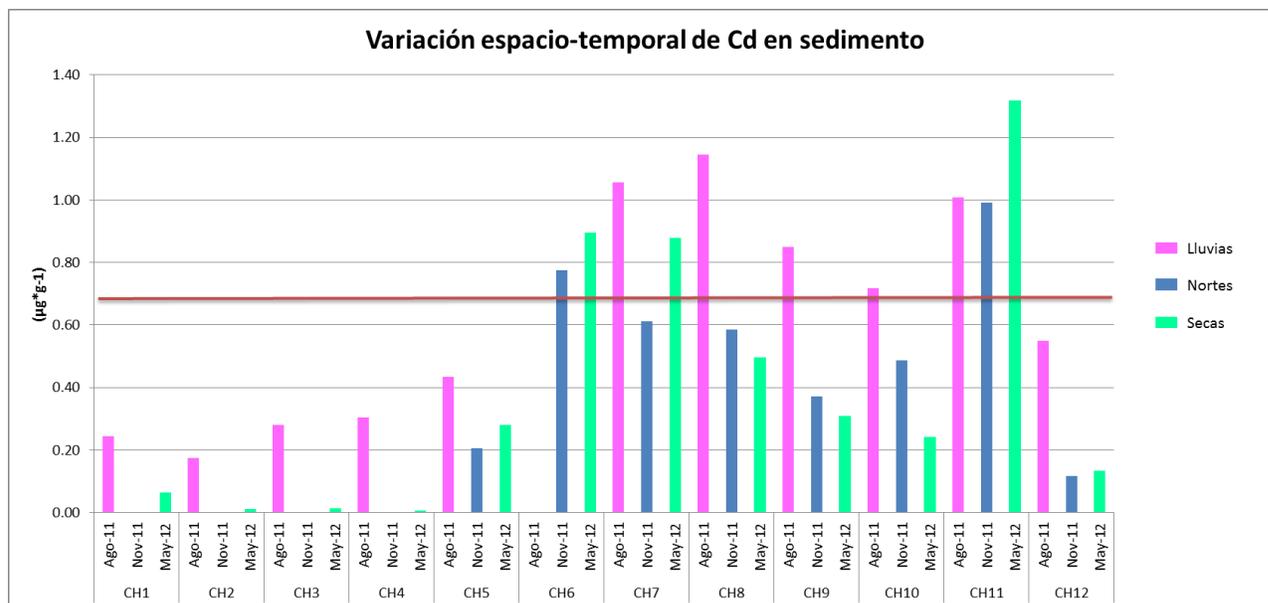


Figura 13. Concentraciones de Cd obtenidas en sedimento superficial de la laguna de Chelem y el límite establecido como criterio ecológico (TEL= 0.680 µg g⁻¹, línea roja).

Las concentraciones de Cd en agua mostraron diferencias significativas entre todas las temporadas. Esto es debido a que existe una elevada concentración de Cd en la temporada de Nortes que llegan hasta los 432.82 µg L⁻¹, en la temporada de lluvias se tienen concentraciones muy bajas que van desde 0.01 hasta 0.99 µg L⁻¹, mientras que para la temporada de secas todos los valores registrados son de 0.0 µg L⁻¹. No se presentaron diferencias significativas espaciales (tabla 14).

Los valores registrados de toxicidad aguda en Cd se encuentran debajo del valor recomendado de 40 µg L⁻¹ (Buchman, 2008), excepto la estación 6 (temporada de Nortes) que rebasó el valor recomendado por las actividades marítimo-portuarias.

Respecto a la toxicidad crónica de Cd, las estaciones 1, 2, 4, 6 y 7 presentan concentraciones que rebasan el valor recomendado de 8.8 µg L⁻¹ (Buchman, 2008), todos ellos en la temporada de Nortes. Esto asociado a la resuspensión de material fino del sedimento durante esta época (figura 14).

Las aguas residuales que llegan a la laguna pueden contener fertilizantes que contengan Cd, promoviendo el incremento de este metal, ya que la concentración de Cd en estos materiales es de 0.05-170 mg/kg (ASTDR, 1999). Los productos con acero que son galvanizados contienen Cd debido a sus propiedades anticorrosivas y son empleados en las actividades marítimo-portuarias. También es muy común que el Cd esté presente en distintas aleaciones. El Cd se encuentra distribuido naturalmente y tiene un proceso de deposición, aunado a esto, existen otras fuentes de acumulación como las actividades antropogénicas y la erosión en la temporada de Nortes puede estar llevando a cabo la resuspensión en la columna de agua.

En términos generales, el agua de la laguna puede representar un riesgo para los organismos pelágicos, especialmente cuando estos se encuentran aún en estadios primarios como larvas y huevos (Buchman, 2008).

Cd agua			
Variación	Prueba	Valor de P	Comparaciones múltiples
Espacial	Kruskal-Wallis	0.969	-
Temporal	Kruskal-Wallis	0.0	Diferencias entre todas

Tabla 14. Variación espacial y temporal de Cd en agua de la laguna de Chelem, pruebas de Kruskal-Wallis.

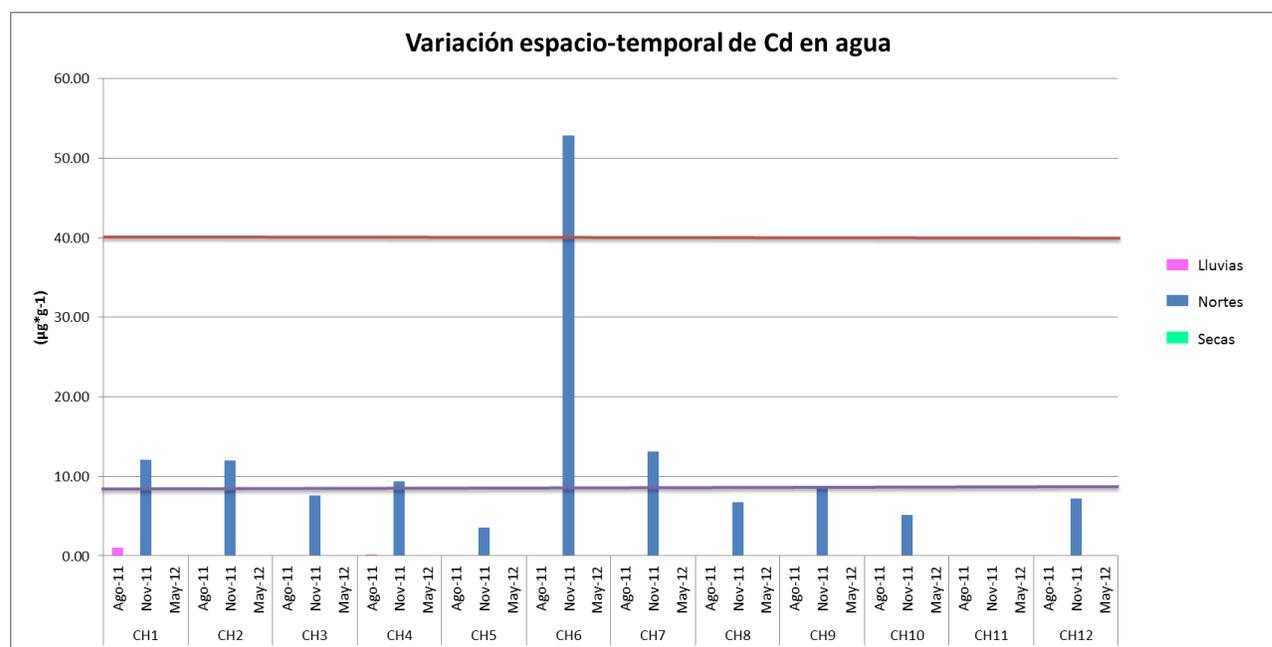


Figura 14. Concentración total de Cd en agua de la laguna de Chelem. (Toxicidad Aguda: 40 $\mu\text{g L}^{-1}$, línea roja toxicidad crónica, 8.8 $\mu\text{g L}^{-1}$, línea morada; Screening Quick Reference Tables).

Arsénico (As)

El As presentó diferencias significativas entre las tres temporadas en sedimento. Predominantemente la mayor concentración de As fue para la temporada de lluvias mientras que las menores concentraciones de As en sedimento se registraron para la temporada de secas. Espacialmente no muestran diferencias significativas (tabla 15).

En la figura 15 se observa que las concentraciones de As se encuentran muy por encima del valor de $7.240 \mu\text{g g}^{-1}$ (Buchman, 2008). Principalmente en la época de lluvias las concentraciones de As son muy superiores. En la estación 9 en la época de lluvias se registró un valor de concentración casi de 16 veces el valor de $7.240 \mu\text{g g}^{-1}$.

Para todos los sitios hay al menos algún valor que sobrepasa el valor de $7.240 \mu\text{g g}^{-1}$ (Buchman, 2008). La mayor presencia de As en la temporada de lluvias puede indicar que el As entra al sistema por escorrentía. El principal problema del As en la actualidad es el aumento de su concentración en aguas subterráneas (Plant, *et al.*, 2004). En Yucatán no hay sistemas eficientes ni suficientes de tratamiento de residuos y es práctica común verterlos directamente en hoyos cavados en el suelo sin aislamiento por lo que los residuos permean al acuífero con el paso del tiempo y son transportados a la zona costera (Uribe, 2011).

Llama la atención que los sitios al interior de la laguna presentan una mayor concentración de As (estaciones 1-5), esto puede estar indicando que este metaloide pueda tener su fuente en las descargas del acuífero más que en las fuentes puntuales de la laguna. Los alimentos balanceados de animales, principalmente aves y cerdos, contienen As para promover una mejor absorción de los nutrimentos, pero este As en su mayoría es desechado por los animales a través de la orina (Espinosa, 2012) y de ahí puede movilizarse debido al inexistente manejo de los residuos hacia el acuífero y llegar a la zona costera.

Las concentraciones elevadas de As en el sedimento no sólo rebasan el valor de efecto mínimo (TEL) sino que también puede estarse presentando ya un nivel de efecto mínimo evidente en bivalvos, debido a que las concentraciones también rebasan el valor de $35 \mu\text{g g}^{-1}$ (Buchman, 2008).

As sedimento			
Variación	Prueba	Valor de P	Comparaciones múltiples
Espacial	ANOVA de una vía	0.914880	-
Temporal	ANOVA de una vía	0.000000	Diferencias entre todas

Tabla 15. Variación espacial y temporal de As en sedimento de la laguna de Chelem, pruebas de ANOVA de una vía.

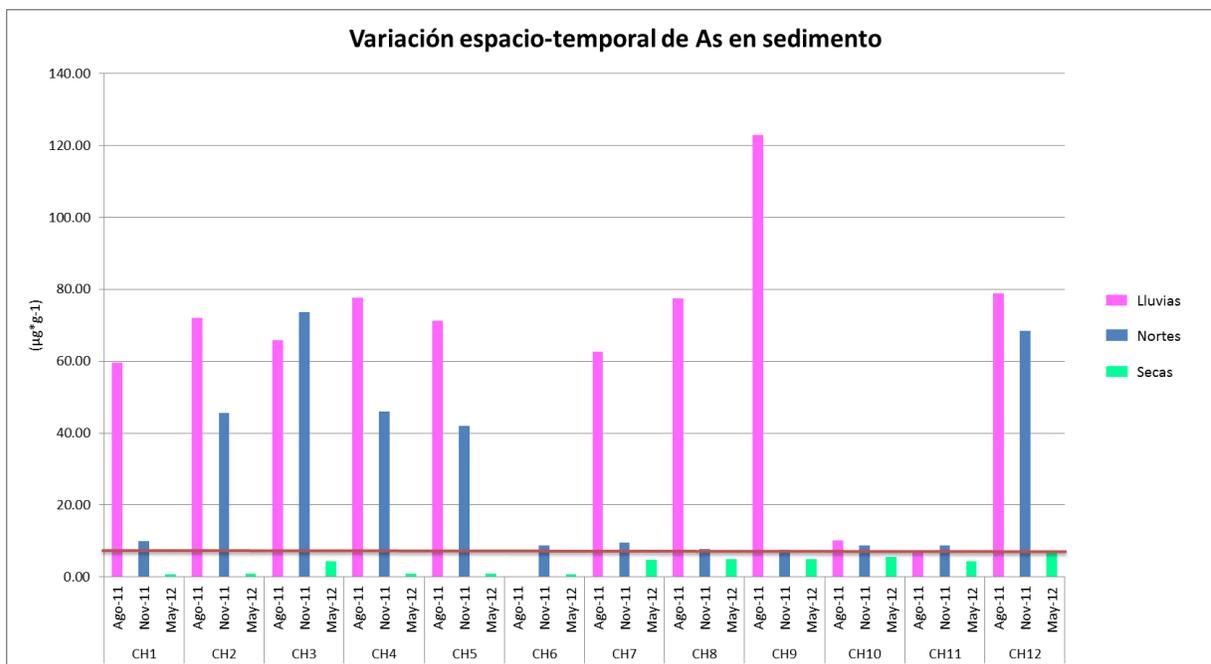


Figura 15. Concentraciones de As obtenidas en sedimento superficial de la laguna de Chelem y el límite establecido como criterio ecológico (TEL= 7.240 µg g⁻¹, línea roja).

Las concentraciones de As en agua presentaron diferencias significativas entre LI-S y N-S. Esto se debe a que en la temporada de Nortes y de lluvias hay una mayor concentración de As a diferencia de la temporada de secas que presenta una menor concentración de As. Espacialmente no se encontraron diferencias significativas (tabla 16).

Lo mismo que observamos en sedimentos lo vemos en el agua, la presencia de As en toda la laguna puede estar relacionada con aportes del acuífero a lo largo de ésta.

Todo el sistema presenta valores por debajo del valor recomendado de 69 µg L⁻¹ (Buchman, 2008) de toxicidad aguda excepto la estación 6 (temporada de Nortes) que rebasa este valor de SQuiRTs.

Respecto a la toxicidad crónica las estaciones 1 y 5 en la temporada de lluvias así como las estaciones 6 y 11 en temporada de Nortes presentan una concentración de As superior a 36 µg L⁻¹ (Buchman, 2008) (figura 16).

As agua			
Variación	Prueba	Valor de P	Comparaciones múltiples
Espacial	Kruskal-Wallis	0.9699	-
Temporal	Kruskal-Wallis	0.0000	LI-S, N-S,

Tabla 16. Variación espacial y temporal de As en agua de la laguna de Chelem, pruebas de Kruskal-Wallis.

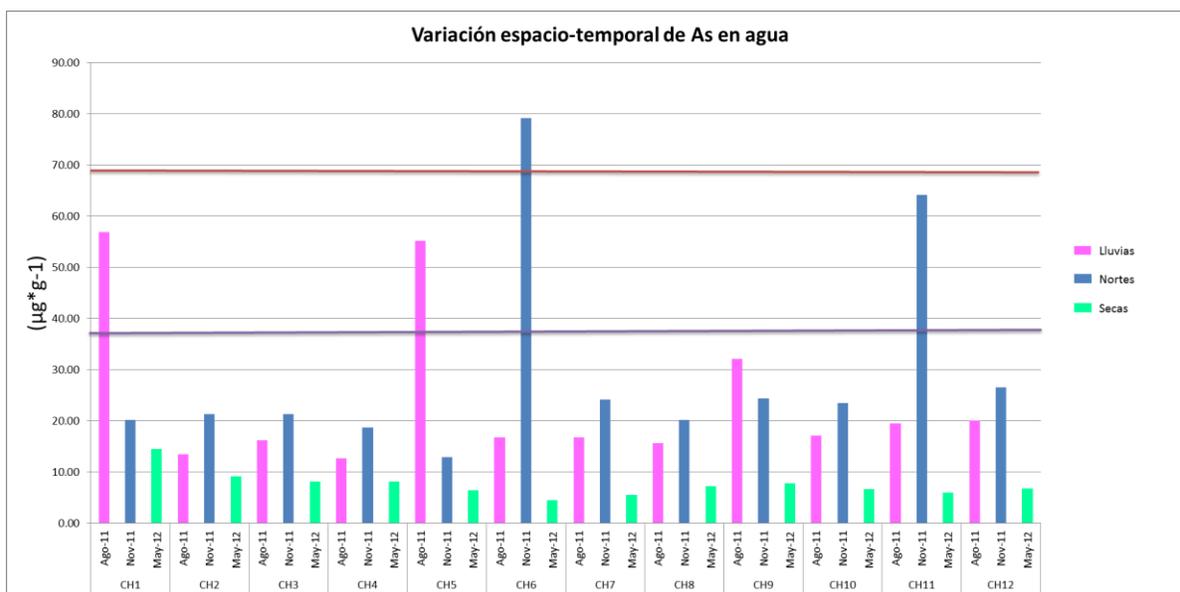


Figura 16. Concentración total de As en agua de la laguna de Chelem (Toxicidad Aguda: $69 \mu\text{g L}^{-1}$, línea roja; toxicidad crónica, $36 \mu\text{g L}^{-1}$, línea morada; Screening Quick Reference Tables).

Cobre (Cu)

Las concentraciones de Cu en sedimento no presentaron diferencias significativas temporales. Espacialmente, existen diferencias significativas entre los sitios 1-10, 2-10, 3-10, 10-12 (tabla 17), esto es debido a que en la estación 10 se presentan las mayores concentraciones de Cu (con mayor concentración de Cu en lluvias) mientras que para los sitios 1, 2, 3 y 12 se obtuvieron las menores concentraciones de Cu.

Las concentraciones de Cu registradas en la zona de desarrollo antropogénico están por encima del valor de SQuiRTs $18.7 \mu\text{g g}^{-1}$ (Buchman, 2008) (figura 17). Este resultado era evidente debido a la entrada directa de aguas residuales urbanas e industriales que contienen Cu en elevadas concentraciones. El Cu es un elemento traza esencial para la vida de los organismos pero también es ampliamente utilizado en diferentes productos que son de utilidad en el hogar debido a que se encuentra en diversas aleaciones (Lentech, 2008; ASTDR, 2004). La presencia del Cu en la laguna puede ser por aportes desde basurales (ya que se detectó chatarra oxidada), la entrada del agua residual doméstica (debido a que en la estación 10 se ubican desagües que desembocan directo a la laguna) combustión de desperdicios y combustibles fósiles (por los motores de lanchas) y por vegetación en descomposición. Cuando el Cu se libera al suelo, puede adherirse fuertemente a la materia orgánica y a capas superficiales de sedimento y puede que no se movilice muy lejos cuando es liberado, por ello la alta concentración de Cu en la estación 10 (ASTDR, 2004).

En general podemos decir que los organismos bentónicos de los sitios 6 a 11 pueden ser potencialmente afectados por el Cu presente. En especial, la estación 10 en la temporada de lluvias, reportó un valor cerca de los $390 \mu\text{g g}^{-1}$, cuyo valor ya estaría indicando un efecto mínimo evidente en las larvas de ostras (Buchman, 2008).

Cu sedimento			
Variación	Prueba	Valor de P	Comparaciones múltiples
Espacial	Anova de una vía	0.003946	CH1-CH10, CH2-CH10, CH3-CH10, CH10-CH12
Temporal	Anova de una vía	0.830096	-

Tabla 17. Variación espacial y temporal de Cu en sedimento de la laguna de Chelem, pruebas de ANOVA de una vía.

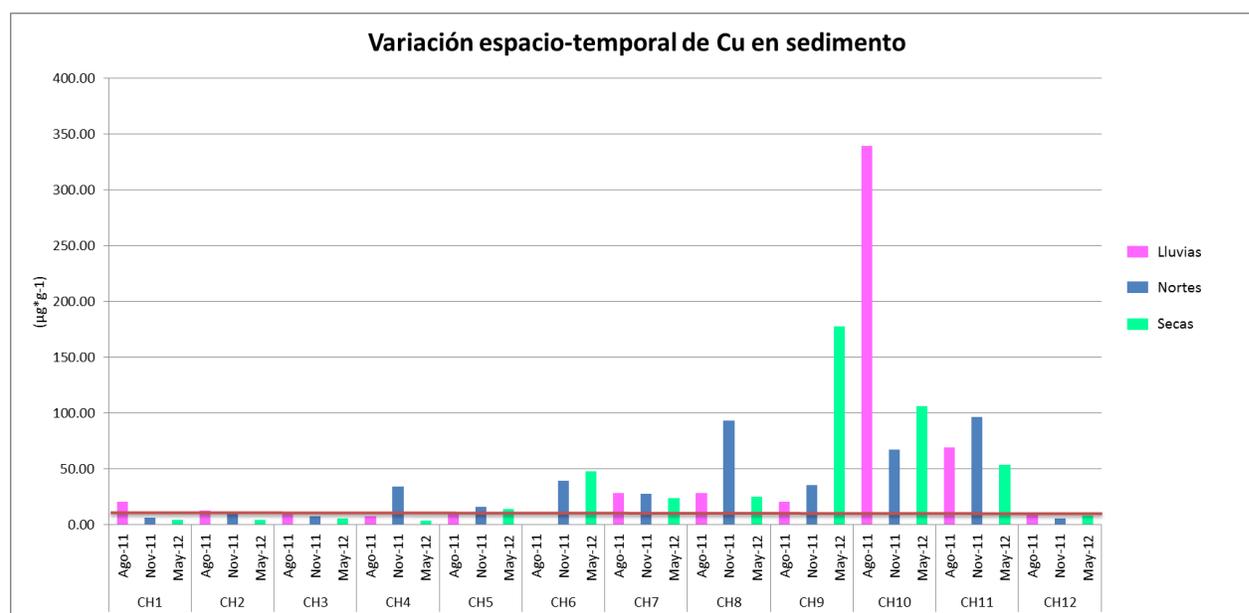


Figura 17. Concentraciones de Cu obtenidas en sedimento superficial de la laguna de Chelem y el límite establecido como criterio ecológico (TEL $18.7 \mu\text{g g}^{-1}$, línea roja).

Las concentraciones de Cu en agua no presentaron diferencias significativas temporales ni espaciales (tabla 18).

Se puede observar en la figura 18 que los valores del sistema registrados se encuentran debajo de la concentración de toxicidad aguda de $4.8 \mu\text{g L}^{-1}$ de Cu (Buchman, 2008). Sólo la estación 1 (época de lluvias) y la estación 9 (época de secas) superan casi el doble este valor de SQiRTs.

El sistema registra valores de concentración por debajo de $3.1 \mu\text{g L}^{-1}$ (Buchman, 2008) de la concentración de la toxicidad crónica. Excepto la estación 1 (época de lluvias) y la estación 9 (época de secas) que de igual manera rebasan este valor.

El Cu y los compuestos de Cu al ser liberados al agua disueltos pueden ser transportados en el agua de la superficie (de la estación 10 a la estación 9, ya que la estación 10 muestra mayor concentración de Cu en sedimento) como Cu unido a partículas suspendidas en el agua. El Cu que entra al agua puede acumularse en la estación 1, lo que provoca que eventualmente sea depositado en el sedimento (ASTR, 2004).

Cu agua			
Variación	Prueba	Valor de P	Comparaciones múltiples
Espacial	Kruskal-Wallis	0.5912	-
Temporal	Kruskal-Wallis	0.3679	-

Tabla 18. Variación espacial y temporal de Cu en agua de la laguna de Chelem, pruebas de Kruskal-Wallis.

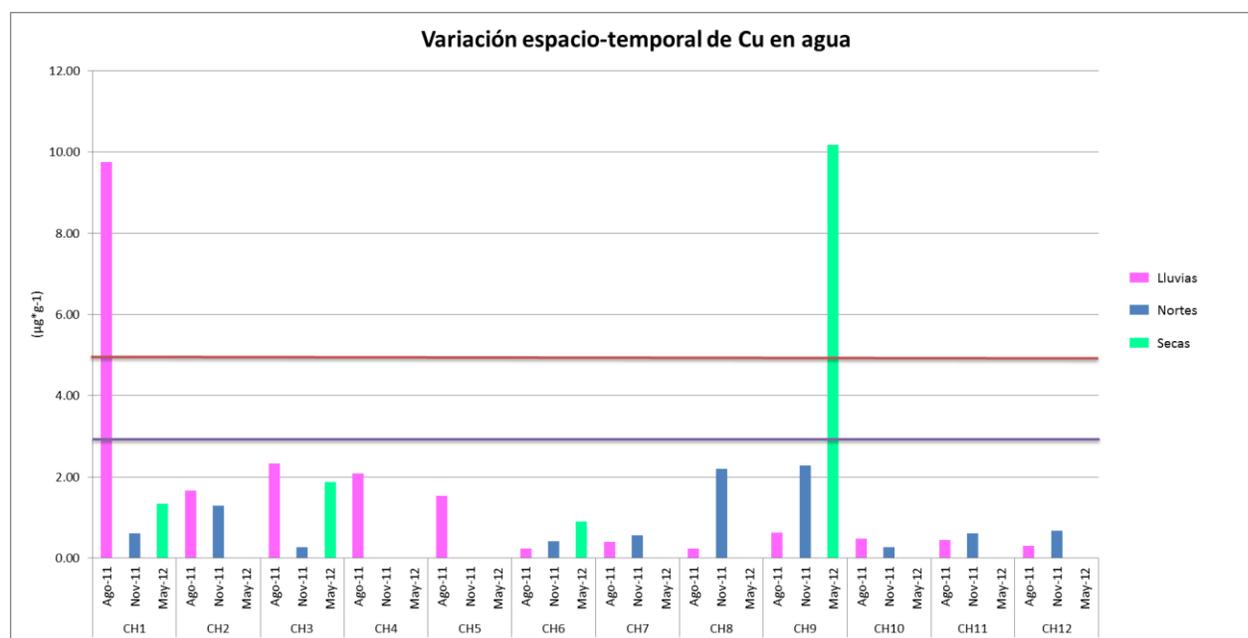


Figura 18. Concentración total de Cu en agua de la laguna de Chelem. Toxicidad Aguda: $4.8 \mu\text{g L}^{-1}$, línea roja, toxicidad crónica, $3.1 \mu\text{g L}^{-1}$, línea morada (Screening Quick Reference Tables).

Estaño (Sn)

Las concentraciones de Sn en sedimento no presentaron diferencias significativas temporales ni espaciales (tabla 19).

En la figura 19 se puede observar que para todo el sistema los valores registrados de Sn en sedimento se encuentran por debajo del valor de $3.4 \mu\text{g g}^{-1}$ (Buchman, 2008). Sin embargo, la estación 11 (temporada de lluvias) se presenta la concentración más elevada de Sn que supera este valor ($3.4 \mu\text{g g}^{-1}$). En la estación 11 se realizan actividades marítimo-portuarias, las congeladoras desechan sus residuos a la laguna sin tratamiento previo, talleres de soldadura (el Sn se emplea en aleaciones para soldar) y una base naval con una gran cantidad de lanchas. Este comportamiento obedece directamente a las actividades de mantenimiento y reparación de embarcaciones que se lleva a cabo en este sitio.

Una fuente importante de aporte de Sn son los anti-incrustantes que contienen tributil-estaño (TBT, por sus siglas en inglés) utilizados en embarcaciones marinas las cuales pueden ser repintadas cada 3 a 6 meses. El TBT también es empleado por su potencial fungicida y bactericida (Miloslavich *et al.*, 2007; Gielen, 1996; Girasolo *et al.*, 2005) y debido a la permeabilidad del suelo, este puede ser transportado hasta la laguna por el aporte de mantos freáticos. La persistencia del TBT en el agua es de 3 días a 35 semanas, mientras que en los sedimentos su descomposición se lleva a cabo entre 16 semanas y 15 años (Stewart y de Mora, 1990). Previamente se han reportado efectos nocivos del TBT tales como acumulación en tejidos de ostras (Shim *et al.*, 1998) y malformaciones en conchas de bivalvos (Oberdörster y Cheek, 2000) pudiendo resultar perjudicial para especies comestibles (Miloslavich *et al.*, 2007) como la “chivita” (*Melongena corona bispinosa*) que es una especie importante de autoconsumo para los pobladores de la localidad de Chelem. Aunado a esto, los compuestos orgánicos de Sn pueden ser degradados a compuestos inorgánicos por la luz solar o bacterias y este se adhiere al suelo y a sedimentos en el agua (ASTR, 2005).

Sn sedimento			
Variación	Prueba	Valor de P	Comparaciones múltiples
Espacial	Kruskal-Wallis	0.0613	-
Temporal	Kruskal-Wallis	0.4210	-

Tabla 19. Variación espacial y temporal de Sn en sedimento de la laguna de Chelem, pruebas de Kruskal-Wallis.

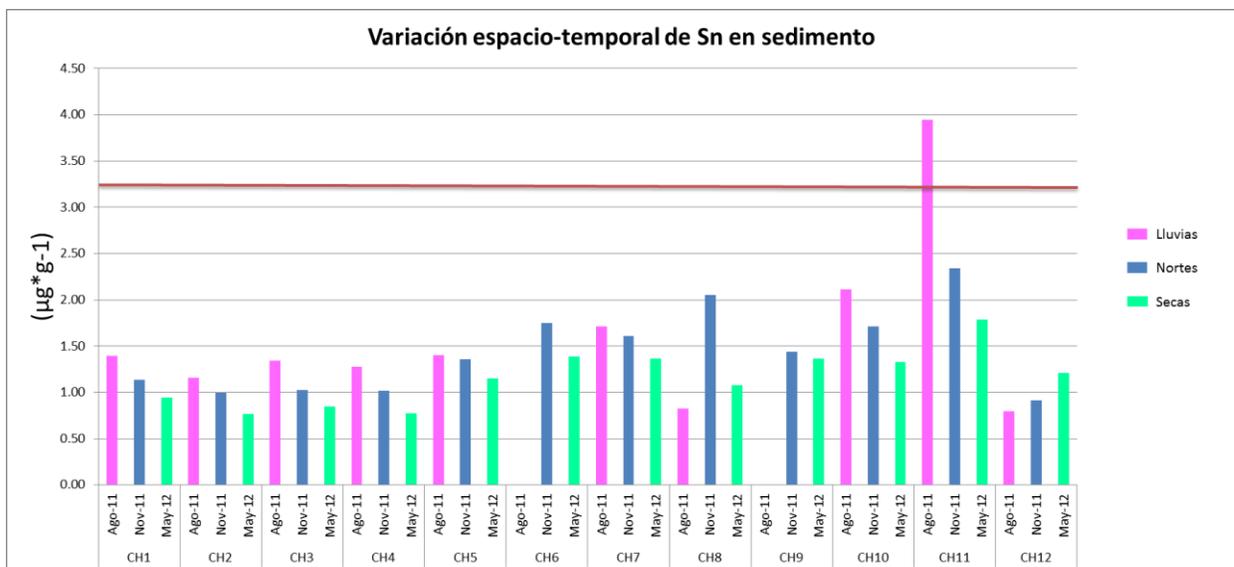


Figura 19. Concentraciones de Sn obtenidas en sedimento superficial de la laguna de Chelem y el límite establecido como criterio ecológico (TEL=3.4 µg g⁻¹, línea roja).

Se presentaron diferencias significativas de Sn en la columna de agua en las temporadas LL-N y N-S. Esto es debido a que en la época de Nortes existe una mayor concentración de Sn mientras que para lluvias y secas hubo una menor concentración de Sn. Espacialmente, no existen diferencias significativas (tabla 20).

En la figura 20 se muestran las concentraciones de Sn en agua. No hay valor de norma recomendado, ya que SQuIRTs no indica valores de toxicidad aguda y toxicidad crónica para el Sn.

Las mayores concentraciones se presentaron para la temporada de Nortes, la cual se espera que exista un incremento en la concentración en la columna de agua por resuspensión de los sedimentos finos, los cuales traen adsorbidos a algunos de los metales, pudiendo ser este el caso del Sn y así mismo ciertos compuestos inorgánicos de Sn se disuelven en agua (ASTR, 2004). El Sn orgánico altera el crecimiento, la reproducción, los sistemas enzimáticos y los esquemas de alimentación de los organismos acuáticos. La exposición tiene lugar principalmente en la capa superior del agua, ya que es ahí donde los compuestos orgánicos del Sn se acumulan. Los compuestos organometálicos de Sn se degradan en los ecosistemas acuáticos. Como resultado final de este proceso se genera Sn inorgánico.

La intensidad del oleaje y la turbidez del agua favorecen las altas concentraciones de TBT en el sitio (IPCS, 1990)

Sn agua			
Variación	Prueba	Valor de P	Comparaciones múltiples
Espacial	Kruskal-Wallis	0.8254	-

Temporal	Kruskal-Wallis	0.0001	LI-N y N-S
----------	----------------	--------	------------

Tabla 20. Variación espacial y temporal de Sn en agua de la laguna de Chelem, pruebas de Kruskal-Wallis.

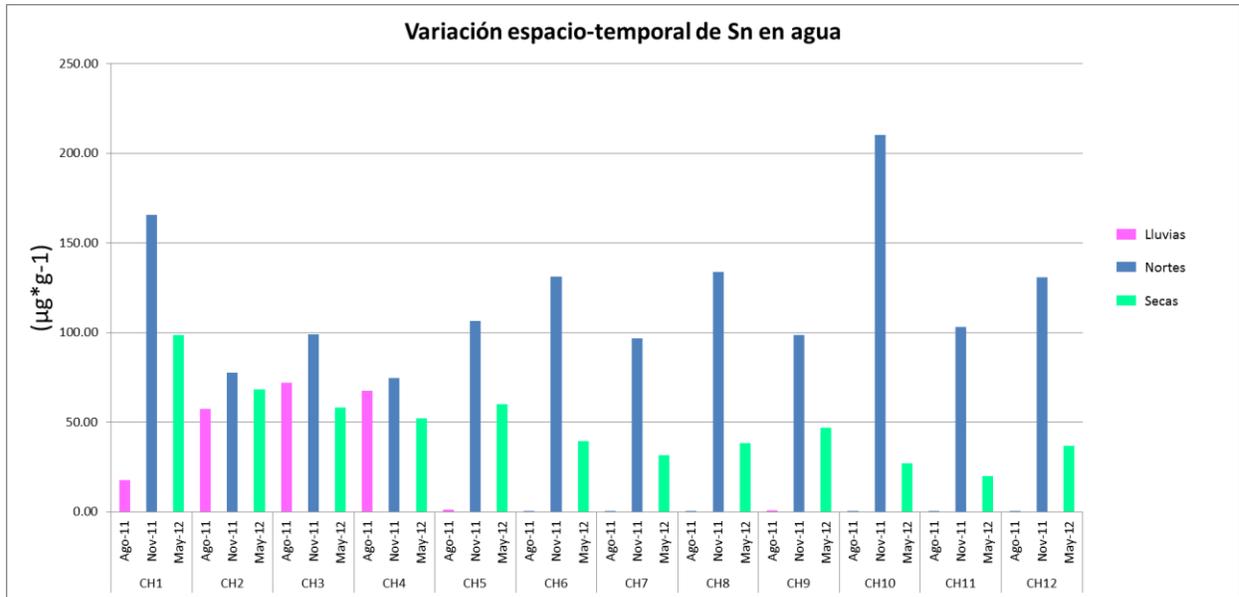


Figura 20. Concentración total de Sn en agua de la laguna de Chelem. No se indica toxicidad (Screening Quick Reference Tables).

Cromo (Cr)

Las concentraciones de Cr en sedimento mostraron diferencias significativas en las temporadas LI-S y N-S. Estas diferencias temporales son debido a registros menores concentraciones de Cr en la temporada de secas. Especialmente, no existen diferencias significativas de las concentraciones de Cr en sedimento (tabla 21). La mayor concentración de Cr fue en la temporada de Nortes, lo que sugiere que el Cr llega a la laguna por escorrentía y flujos de agua. La presencia de Cr aún en bajas concentraciones puede deberse a que se emplea en el galvanizado de metales, como pigmento y en los fertilizantes (Gauglhoer y Bianchi, 1991).

En la figura 21 se observa que los valores de concentración de Cr en sedimento. Para todo el sistema se encuentran por debajo del límite de daño aparente $52.3 \mu\text{g g}^{-1}$ (Buchman, 2008).

Cr sedimento			
Variación	Prueba	Valor de P	Comparaciones múltiples
Espacial	Kruskal-Wallis	0.6852	-
Temporal	Kruskal-Wallis	0.0014	LI-S, N-S

Tabla 21. Variación espacial y temporal de Cr en sedimento de la laguna de Chelem, pruebas de Kruskal-Wallis.

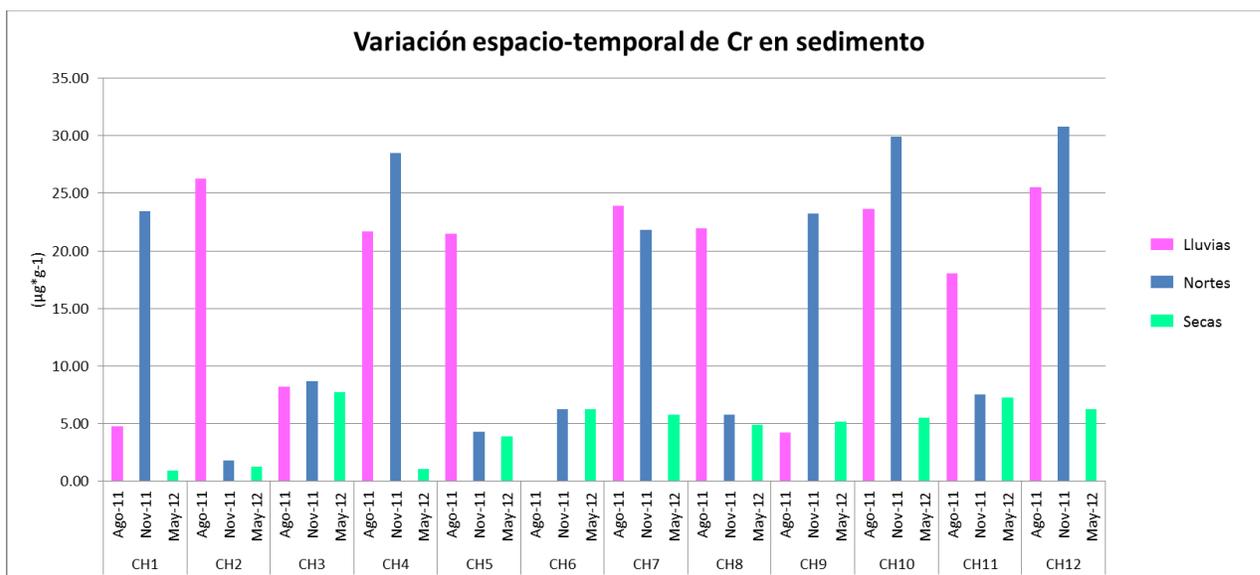


Figura 21. Concentraciones de Cr obtenidas en sedimento superficial de la laguna de Chelem (TEL= 52.3 µg g⁻¹).

Las concentraciones de Cr en agua presentaron diferencias significativas en las temporadas de LI-N, N-S. Estas diferencias son por las bajas concentraciones de Cr durante la temporada de Nortes para todo el sistema. Espacialmente, no se encontraron diferencias significativas (tabla 22).

En la figura 22 se presentan los valores de concentración de Cr en agua de la laguna de Chelem. Al igual que para el Sn, no hay valor de norma recomendado ya que SQuiRTs no indica valores de toxicidad aguda y toxicidad crónica para Cr en agua. Por lo anterior, se tomaron como referencia valores de Lenntech (2008) en los que indican que el Cr en los peces de mar se encuentra entre 7 y 400 µg g⁻¹, para *Daphnia spp.* entre 0.01-0.26µg g⁻¹, y para algas 0.032 a 6.4 µg g⁻¹. En este caso las concentraciones de Cr en la columna de agua no presentan riesgos para los peces pero si para *Daphnia spp.* y las algas ya que principalmente en temporada de lluvias los valores de Cr en la columna de agua rebasan los valores de concentración aceptables para estos organismos. Las algas resultan ser organismos sumamente importantes ya que estos organismos son fundamentales ya que representan más del 70% de la producción primaria (Ortegón *et al.*, 2010). La presencia del Cr en la columna de agua puede deberse a que el Cu-Ni-Cr se aplica en aleaciones utilizadas en equipos marinos que requieren alta resistencia a la corrosión (Nriagu, 1988).

Cr agua			
Variación	Prueba	Valor de P	Comparaciones múltiples
Espacial	Kruskal-Wallis	0.5912	-
Temporal	Kruskal-Wallis	0.0018	LI-N, N-S

Tabla 22. Variación espacial y temporal de Cr en agua de la laguna de Chelem, pruebas de Kruskal-Wallis.



Figura 22. Concentración total de Cr en agua de la laguna de Chelem. No se indica toxicidad para Cr total (Screening Quick Reference Tables).

Níquel (Ni)

Las concentraciones de Ni en sedimento presentaron diferencias significativas en las temporadas N-S debido a la concentración elevada de Ni durante la temporada de Nortes y una concentración baja de Ni durante la temporada de secas. Especialmente, no se obtuvieron diferencias significativas (tabla 23).

Las concentraciones de Ni en sedimentos están por encima del valor de $15.9 \mu\text{g g}^{-1}$ (Buchman, 2008) para las estaciones: 1, 4, 7, 9, 10, 11 y 12 (temporada de Nortes) (figura 23) debido a la lixiviación del área, provocados por las lluvias o transportados por los vientos fuertes característicos, que pueden estar transportando el Ni de la zona directamente hacia la laguna.

Ni sedimento			
Variación	Prueba	Valor de P	Comparaciones múltiples
Espacial	Kruskal-Wallis	0.8961	-
Temporal	Kruskal-Wallis	0.0150	N-S

Tabla 23. Variación espacial y temporal de Ni en sedimento de la laguna de Chelem, pruebas de Kruskal-Wallis.

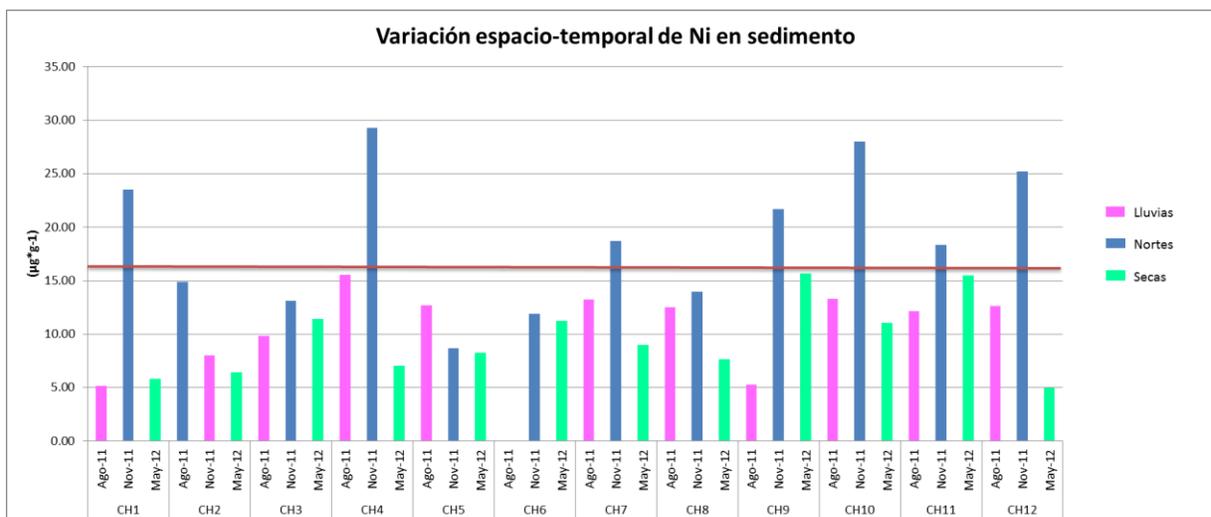


Figura 23. Concentraciones de Ni obtenidas en sedimento superficial de la laguna de Chelem y el límite establecido como criterio ecológico (TEL= 15.9 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, línea roja).

Las concentraciones de Ni en agua presentaron diferencias significativas en las temporadas N-S ya que en la temporada de Nortes se registraron altas concentraciones y en la temporada de secas bajas concentraciones de Ni. Espacialmente, no se presentaron diferencias significativas (tabla 24).

En la figura 24 se observa que algunos valores de concentración de Ni para toxicidad aguda superan el valor de 74 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (Buchman, 2008). Las estaciones que superan dicho valor son 2 y 3 (temporada de lluvias) y 6, 9 y 11 (temporada de Nortes). Cabe destacar que la estación 6 supera el valor de toxicidad aguda el doble del valor. El sistema en general supera el valor de concentración de toxicidad crónica de 8.2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (Buchman, 2008) con al menos un valor de concentración (mayormente en la temporada de Nortes) exceptuando la estación 5 que los valores de concentración de Ni registrados en las tres temporadas están por debajo del valor recomendado.

La movilidad y biodisponibilidad del Ni en medio acuoso están influenciadas por factores ambientales tales como el pH, el potencial de óxido-reducción y la presencia de materia orgánica y de material particulado inorgánico (Callahan *et al.*, 1979). Lo cual representa una amenaza potencial a los organismos bentónicos de la laguna.

Se observa en la figura 24 que la estación 6 es la que más concentración de Ni presenta debido a que en este sitio hay asentamientos humanos con desagües que desembocan directamente a la laguna, así como baterías y pigmentos. También se realizan actividades marítimo-portuaria que puede estar aportando Ni que se encuentra contenido en pigmentos, anticorrosivos y antisarricidas que son empleados en la construcción y reparación de embarcaciones (ASTDR, 2005).

Ni agua			
Variación	Prueba	Valor de P	Comparaciones múltiples
Espacial	Kruskal-Wallis	0.9699	-
Temporal	Kruskal-Wallis	0.0000	N-S

Tabla 24. Variación espacial y temporal de Ni en agua de la laguna de Chelem, pruebas de Kruskal-Wallis.

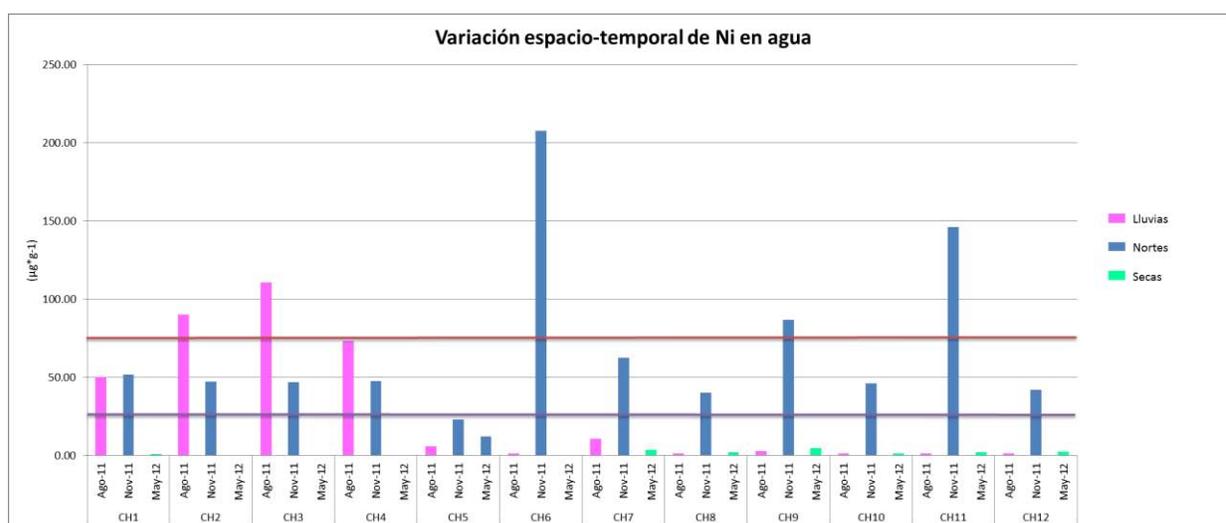


Figura 24. Concentración total de Ni en agua de la laguna de Chelem (Toxicidad Aguda: $74 \mu\text{g L}^{-1}$, línea roja, toxicidad crónica, 8.2 mg L^{-1} , línea morada; Screening Quick Reference Tables).

Ubicación de los sitios que pasan los valores recomendados de SQiRTs

En este apartado se presentan por medio de mapas, los sitios que presentan ya sea metales o el As, que rebasan los valores recomendados de SQiRTs (Buchman, 2008), en agua (tabla 8) y en sedimento (tabla 9), por temporadas (Nortes, lluvias y secas) y anuales. Los mapas muestran la sumatoria de elementos que rebasan los SQiRTs (Buchman, 2008), utilizando como código de incremento el tamaño del círculo (para mayor información ver leyenda de los mapas). Este es un análisis integral de la situación de la contaminación por metales y As en Chelem, donde se considera que la presencia de más de un metal constituye un incremento en el potencial daño al sistema. Sin embargo, dicho análisis es cualitativo ya que las interacciones entre metales y condiciones fisicoquímicas pueden incrementar de manera no lineal el daño que los metales pueden hacer a la laguna de Chelem.

Tabla 25. Valores recomendados de SQuiRTs de metales y As en agua.

Elemento	T A ¹² µg L ⁻¹	T C ¹³ µg L ⁻¹
Pb	210	8.1
Cd	40	8.8
As	69	36
Cu	4.8	3.1
Sn	-	-
Cr	-	-
Ni	74	8.2

Tabla 26. Valores recomendados de SQuiRTs de metales y As en sedimento.

Elemento	Valor de TEL µg g ⁻¹ (SQuiRTs)
Pb	30.24
Cd	0.680
As	7.240
Cu	18.7
Sn	3.4
Cr	52.3
Ni	15.9

Sitios que rebasan valores de SQuiRTs en sedimento durante la temporada de lluvias.

En la figura 25 se puede observar que en la temporada de lluvias todos los sitios de muestreo, exceptuando la estación 6, las concentraciones de metales rebasan los valores de SQuiRTs.

Para esta temporada se obtuvo que el As es el elemento que rebasó en todos los sitios el valor recomendado (excepto en la estación 6) seguido del Cu cuya alta concentración fue reportada en 7 estaciones que son 1, 7, 8, 9, 10, 11 y 12. Sólo se obtuvo un único valor por encima de los valores recomendados de Cd en la estación 1, y Sn en la estación 11.

Las estaciones que más metales presentaron son las estaciones 1 (Cd, As y Cu) y 11 (As, Cu y Sn) con tres metales, seguidos de las estaciones 7, 8, 9, 10 y 12 con dos metales (As y Cu para todas estas estaciones) y por último las estaciones 2, 3 y 4 (As para todos los sitios) con un solo metal.

¹² Toxicidad Aguda de metales y As. Unidades de medida microgramos sobre litro.

¹³ Toxicidad Crónica de metales y As. Unidades de medida microgramos sobre litro.

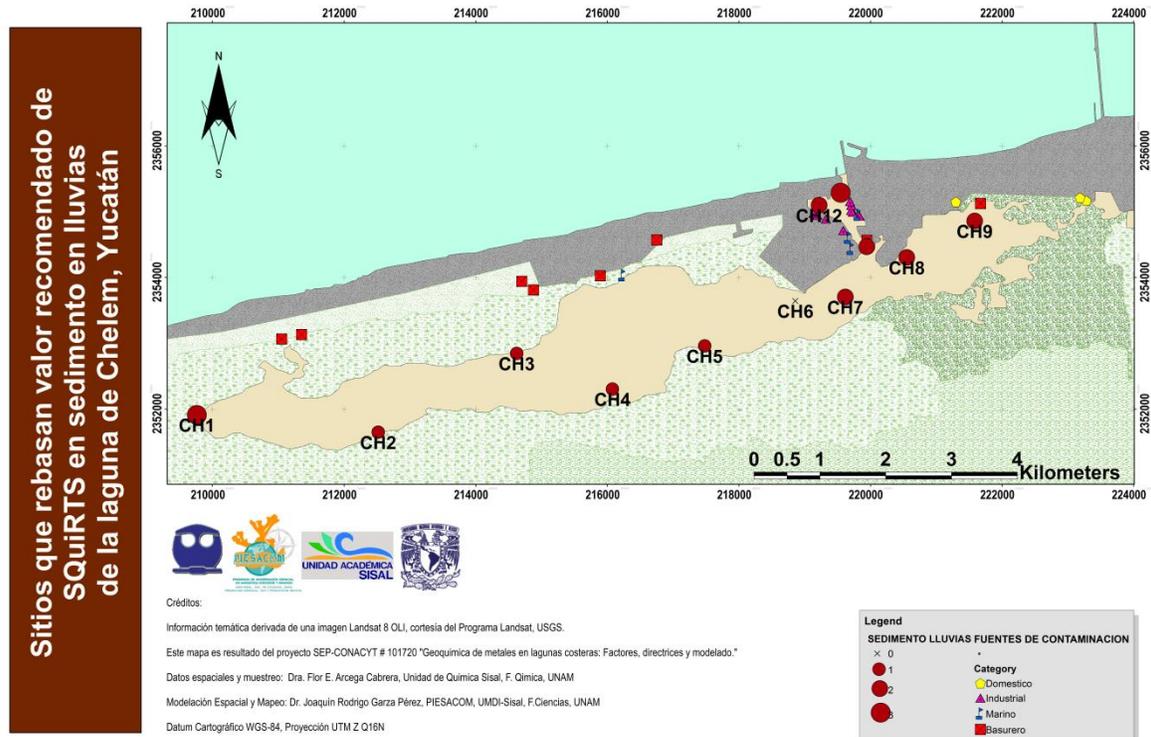


Figura 25. Se presentan los sitios que rebasan valor recomendado de SQiRTs en sedimento durante la temporada de lluvias. Las estaciones con más metales que rebasan valores recomendados son las estaciones 1 y 11. Tomado de Arcega-Cabrera *et al.*, 2015.

Sitios que rebasan valores de SQiRTs en sedimento durante la temporada de Nortes.

En la figura 26 se puede observar que en la temporada de Nortes todos los sitios de muestreo las concentraciones de metales rebasan los valores de SQiRTs.

En la temporada de Nortes también se obtuvo una mayor presencia de As ya que de igual manera para todos los puntos de muestreo paso el valor recomendado, seguido de Cd que a excepción de la estación 11 se encontró en todas las estaciones de muestreo por encima del valor recomendado. El Cu rebaso el valor recomendado en 7 estaciones, así mismo el Ni rebaso el valor en 7 estaciones.

Las estaciones que más metales presentaron son 4, 7, 9 y 10 (Cd, As, Cu y Ni para todos estos sitios) con cuatro metales, seguidos de las estaciones 1 (Cd, As y Ni), 6 (Cd, As y Cu), 8 (Cd, As y Cu), 11 (As, Cu y Ni) y 12 (Cd, As y Ni) con tres metales, y finalmente las estaciones 2, 3 y 5 (Cd y As para todos los sitios) con dos metales.

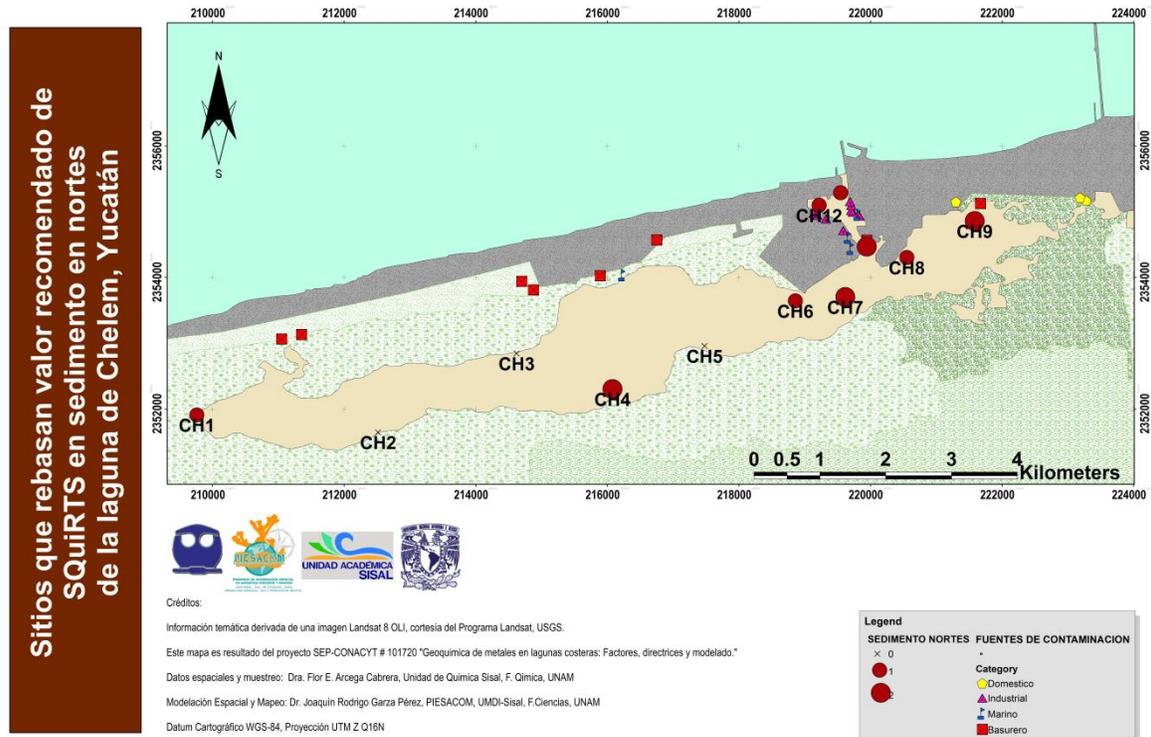


Figura 26. Se presentan los sitios que rebasan valor recomendado de SQiRTs en sedimento durante la temporada de Nortes. Tomado de Arcega-Cabrera *et al.*, 2015.

Sitios que rebasan valores de SQiRTs en sedimento durante la temporada de secas.

En la figura 27 se puede observar que en la temporada de secas los metales que rebasaron el valor de norma recomendado por SQiRTs se encuentran en la entrada de la laguna y en la boca.

En la temporada de secas se obtuvo una mayor concentración de Cu por encima del valor recomendado ya que se encuentra en las estaciones 6, 7, 8, 9, 10 y 11. Sólo se obtuvo un único valor por encima del valor recomendado por As en la estación 12.

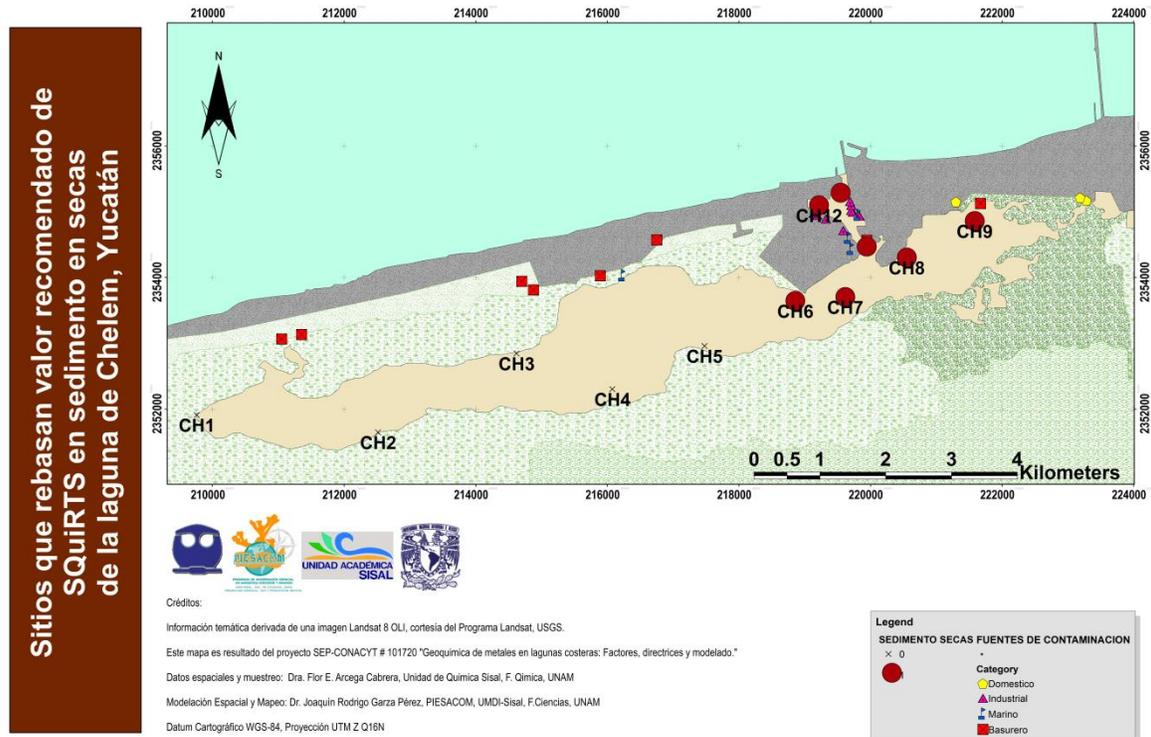


Figura 27. Se presentan los sitios que rebasan valor recomendado de SQiRTS en sedimento durante la temporada de secas. Las estaciones con más metales que rebasan valores recomendados son las estaciones 6, 7, 8, 9, 10, 11 y 12. Tomado de Arcega-Cabrera *et al.*, 2015.

Contaminación anual por metales en sedimento.

En la figura 28 se puede observar que durante las tres temporadas (lluvias, en agosto de 2011; Nortes, en noviembre de 2012 y secas, en mayo del 2012) y en todos los sitios muestreados, rebasan algún valor de SQiRTs recomendado.

Anualmente para sedimento, los elementos que rebasaron de SQiRTs (Buchman, 2008) fueron: el As en todos los sitios de muestreo, el Cd en todos los sitios de muestreo excepto en la estación 11, el Cu en 9 estaciones, el Ni en 7 estaciones y el Sn en sólo una estación.

Las estaciones que más metales presentaron son las estaciones 1, 4, 7, 9, 10, 11 (As, Cu, Sn y Ni) y 12 (Cd, As, Cu y Ni para todos estos sitios) con cuatro metales, seguidos de las estaciones 6 y 8 con tres metales (Cd, As y Cu) y finalmente las estaciones 2, 3 y 5 con dos metales (Cd y As).

Las concentraciones de Pb y de Cr para sedimento en ninguna temporada rebasan los valores de SQiRTs, anualmente no se reportan valores elevados en ningún sitio de muestreo para la laguna de Chelem.

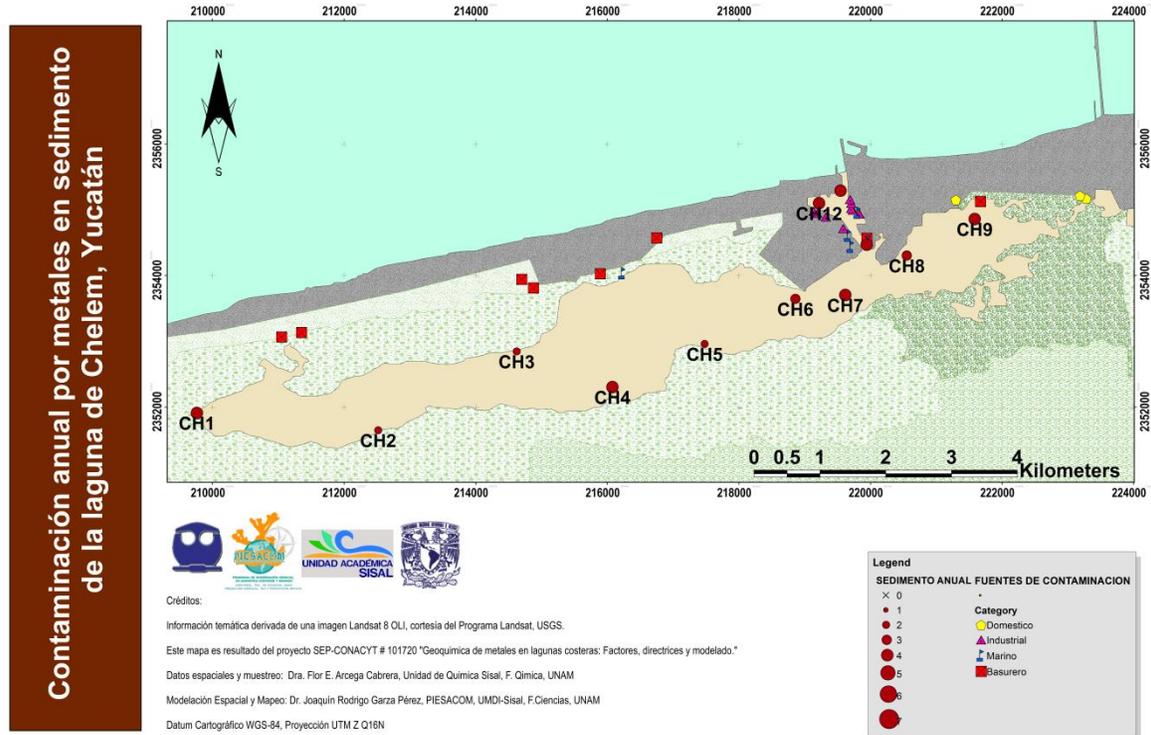


Figura 28. Contaminación por metales en sedimento durante las temporadas representativas de la zona, lluvias, en agosto del 2011; Nortes, noviembre de 2012 y secas, mayo del 2012. Las estaciones que más metales presentaron son las estaciones 1, 4, 7, 9, 10, 11. Tomado de Arcega-Cabrera *et al.*, 2015.

Sitios que rebasan valores de Toxicidad Aguda (SQuiRTs) en agua en temporada de lluvias

En la figura 29 se puede observar que en la temporada de lluvias se presentaron valores que rebasaron el valor de SQuiRTs para Cu, en la estación 1, y de Ni en las estaciones 2 y 3. Con estos valores se rebasa los límites recomendados de SQuiRTs para esta temporada en los sitios que se ubican al interior de la laguna.

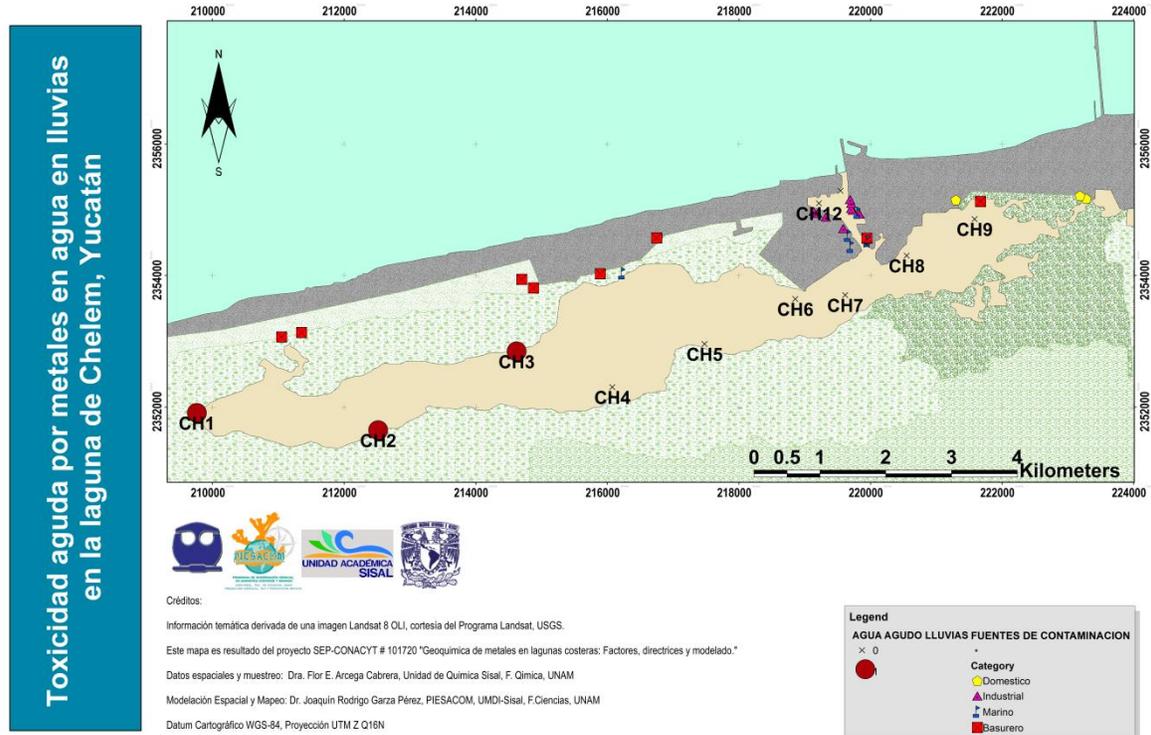


Figura 29. Toxicidad aguda por metales en agua en la temporada de lluvias. Las estaciones con más metales que rebasan valores recomendados son las estaciones 2, 3 y 1. Tomado de Arcega-Cabrera *et al.*, 2015.

Sitios que rebasan valores de Toxicidad Aguda (SQuiRTs) en agua en temporada de Nortes

Para la temporada de Nortes a diferencia de la temporada de lluvias, los valores que rebasaron SQuiRTs se encontraron en la boca de la laguna (figura 30).

Las estaciones que más metales presentaron son: 6 con cuatro metales (Pb, Cd, As y Ni) y la estación 9 y 11 con un metal cada una (Ni).

El Ni fue el metal que más rebasó el valor de SQuiRTs ya que tuvo presencia en cuatro estaciones por encima del valor recomendado.

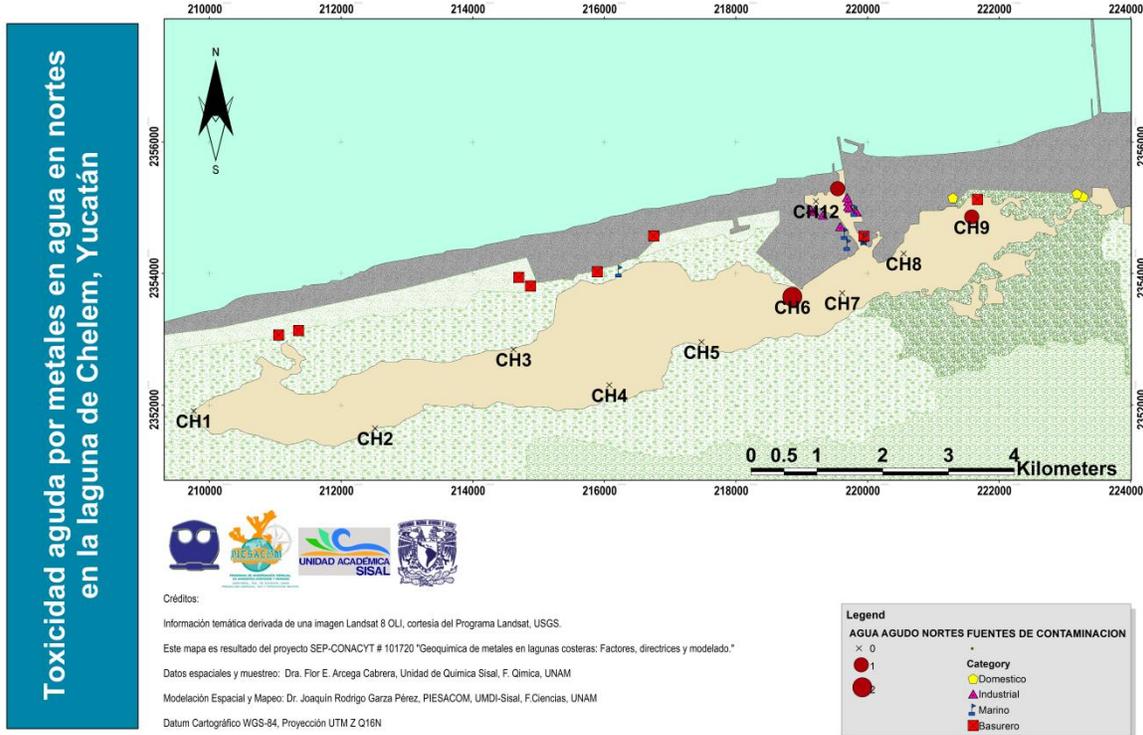


Figura 30. Toxicidad aguda por metales en agua en temporada de Nortes. En la estación 6 se registraron más metales que rebasaron el valor de norma. Tomado de Arcega-Cabrera *et al.*, 2015.

Sitios que rebasan valores de Toxicidad Aguda (SQuiRTs) en agua en temporada de secas

En la temporada de secas sólo el Cu rebasó el valor de SQuiRTs en la estación 9 (figura 31).

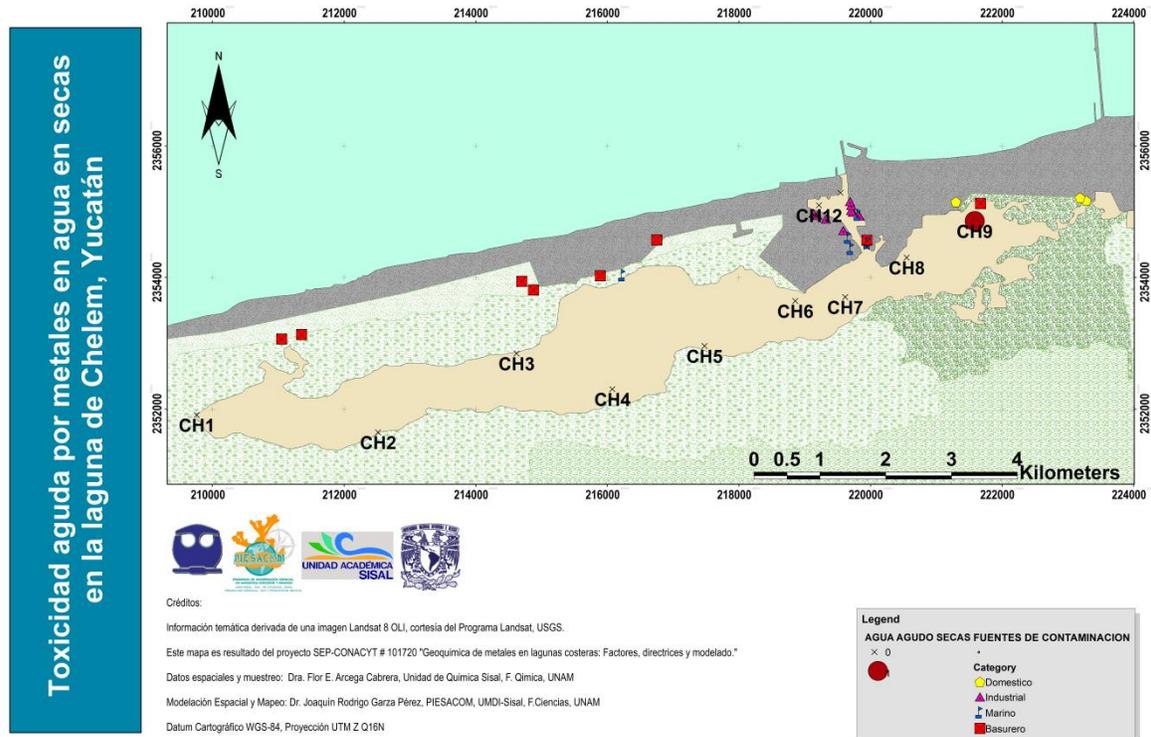


Figura 31. Toxicidad aguda por metales en agua en temporada de secas. Sólo se obtuvo que el Cu rebasó valor de SQiRTs en la estación 9. Tomado de Arcega-Cabrera *et al.*, 2015.

Toxicidad aguda anual (SQiRTs) por metales en agua

En la figura 32 se puede observar que durante las temporadas (lluvias, en agosto de 2011; Nortes, noviembre de 2012 y secas, mayo del 2012), no todos los sitios muestreados rebasan los valores de SQiRTs.

Las estaciones que más metales presentaron son la estación 6 con cuatro metales (Pb, Cd, As y Ni), la estación 9 con 2 metales (Cu y Ni) y finalmente las estaciones 1 (Cu), 2 (Ni), 3 (Ni), y 11 (Cr) con un solo metal.

El Ni es el metal que más veces rebasó el valor de SQiRTs (4 estaciones) mientras que las concentraciones de Sn en ninguna temporada rebasaron los valores de SQiRTs. Anualmente no se reportan valores elevados en ningún sitio de muestreo para la laguna de Chelem.

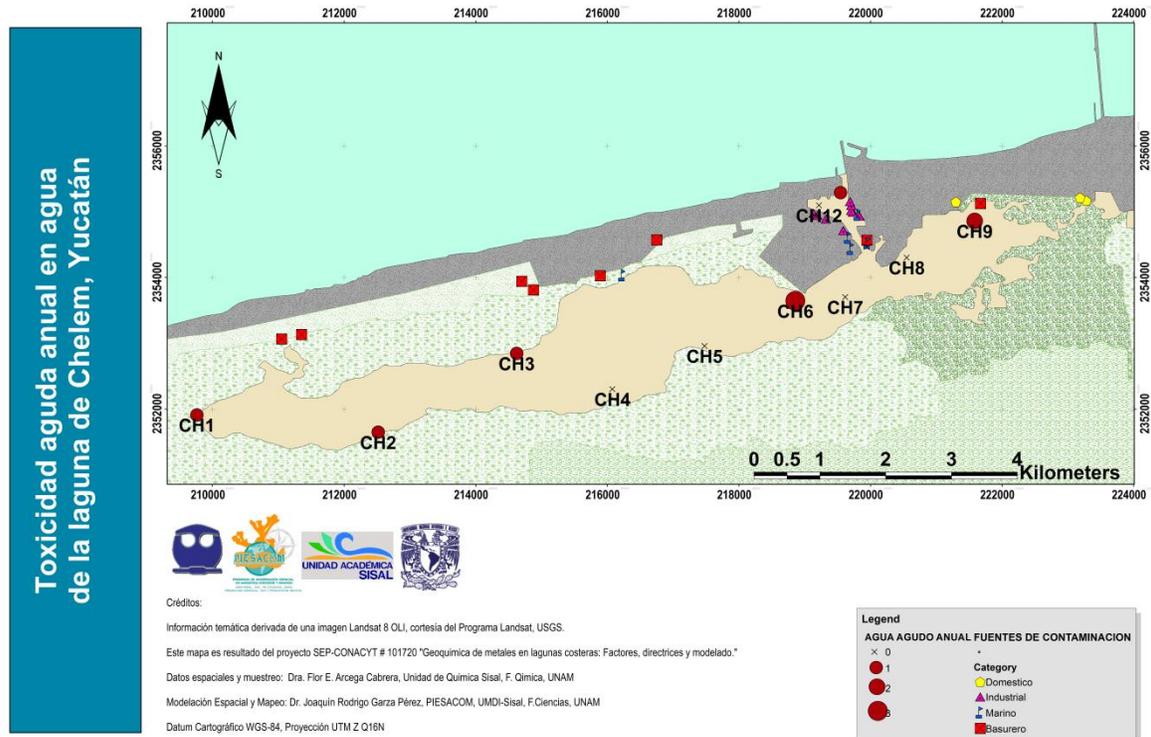


Figura 32. Toxicidad aguda anual. La estación 6 fue la que anualmente registró mayores concentraciones de metales. Tomado de Arcega-Cabrera *et al.*, 2015.

Sitios que rebasan valores de Toxicidad Crónica (SQuiRTs) en agua en temporada de lluvias

En la figura 33 se puede observar que para la temporada de lluvias la mayoría de los sitios que rebasan los valores recomendados, se ubican al interior de la laguna.

Las estaciones que más metales presentaron son la estación 1 con cuatro metales (Pb, As, Cu y Ni), la estación 4 con dos metales (Pb y Ni), y por último las estaciones 2, 3, 5, y 7 con un solo metal (Ni para todos estos sitios, excepto la estación 5 con As).

El metal que en esta temporada rebasó el valor recomendado fue el Ni (rebasó valor de SQuiRTs en 5 estaciones) seguido del Pb y el As (rebasaron valores de SQuiRTs en 2 estaciones) y finalmente el Cu (rebasó valor de SQuiRTs en una estación).

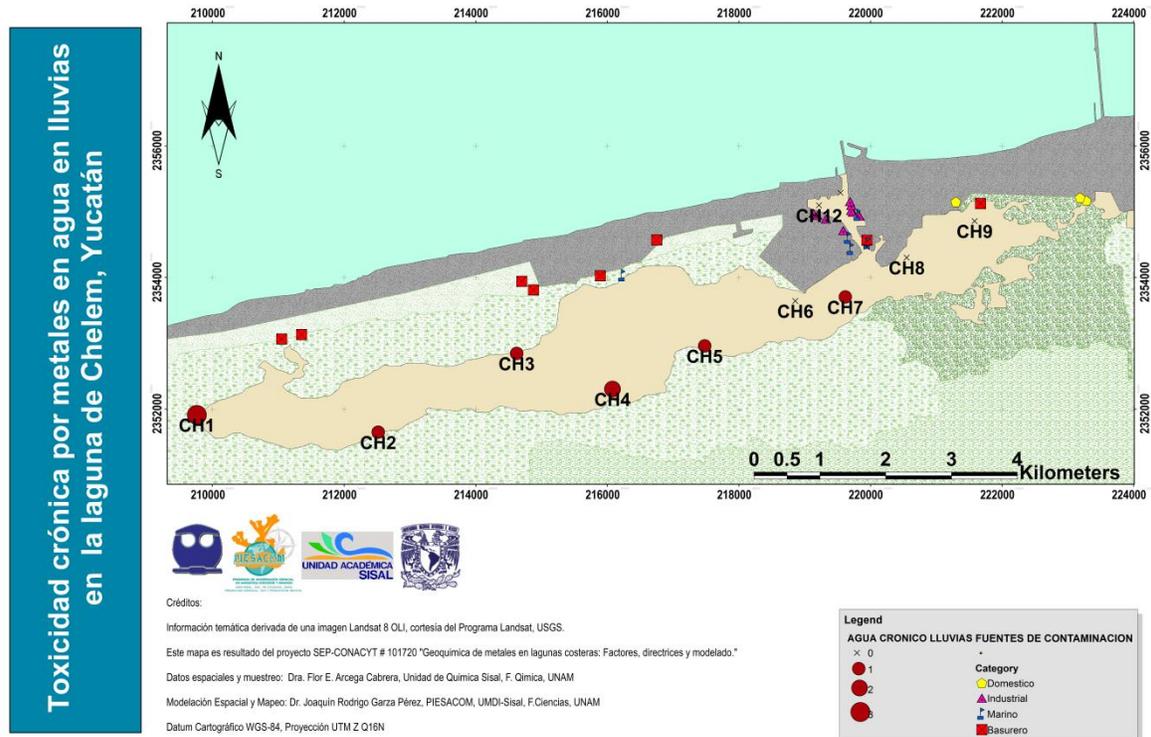


Figura 33. Toxicidad crónica por metales en agua en temporada de lluvias. En la estación 1 se registraron más metales que rebasaron el valor de norma. Tomado de Arcega-Cabrera *et al.*, 2015.

Sitios que rebasan valores de Toxicidad Crónica (SQuiRTs) en agua en temporada de Nortes

En la figura 34 se puede observar que todos los sitios presentan concentraciones de metales que rebasan valores de SQuiRTs durante la temporada de Nortes.

El sitio que más metales presentó fue la estación 6 con cuatro metales (Pb, Cd, As y Ni), las estaciones 1, 2, 3, 4, 7, y 11 con tres metales (Pb, Cd y Ni para todos los sitios excepto la estación 11 que presentó Pb, As y Ni) y finalmente las estaciones 3, 5, 8, 9, 10 y 12 con dos metales (Pb y Ni para todos los sitios).

El Pb y el Ni fueron los metales que en todos los sitios rebasaron el valor recomendado por SQuiRTs, el Cd en 5 estaciones y el As en dos estaciones.

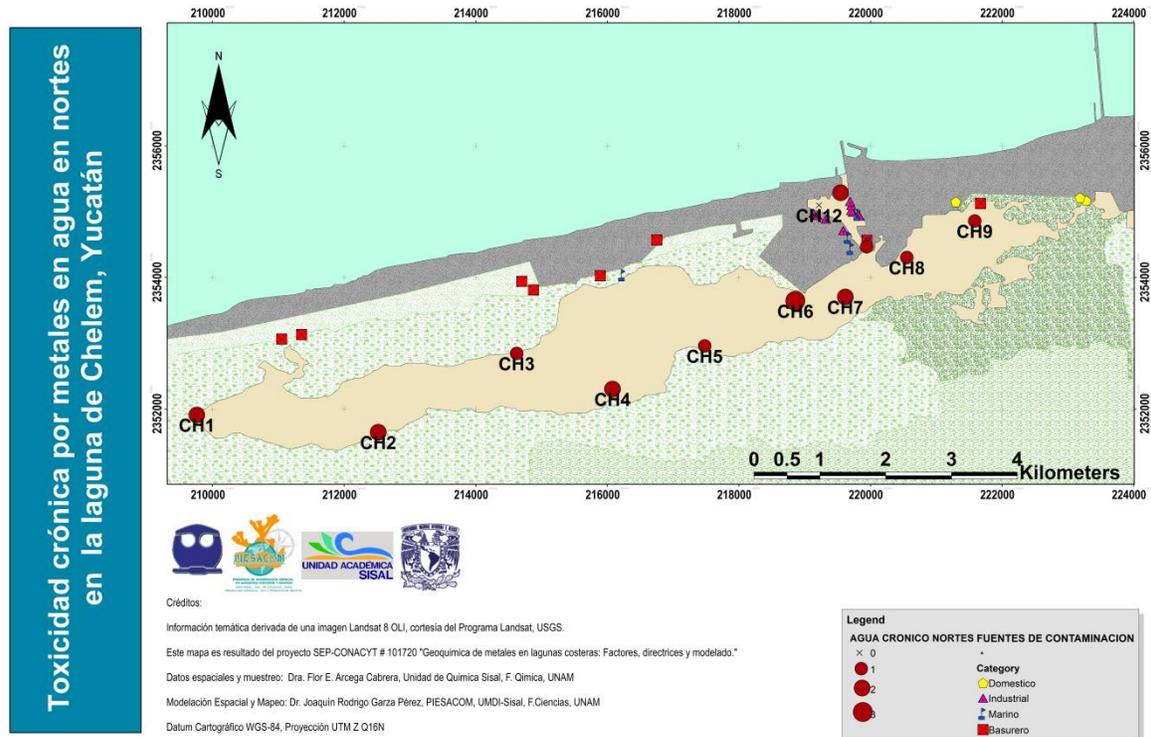


Figura 34. Toxicidad crónica por metales en la temporada de nortes. En la estación 6 se registraron más metales que rebasaron el valor de norma. Tomado de Arcega-Cabrera *et al.*, 2015.

Sitios que rebasan valores de Toxicidad Crónica (SQuiRTs) en agua en temporada de secas

En la figura 35 se puede observar que sólo en dos sitios se presentan valores de concentraciones de metales que rebasan SQuiRTs durante la temporada de secas.

La estación 5 con elevadas concentraciones de Ni y la estación 9 con elevadas concentraciones de Cu rebasaron los valores de SQuiRTs recomendados.

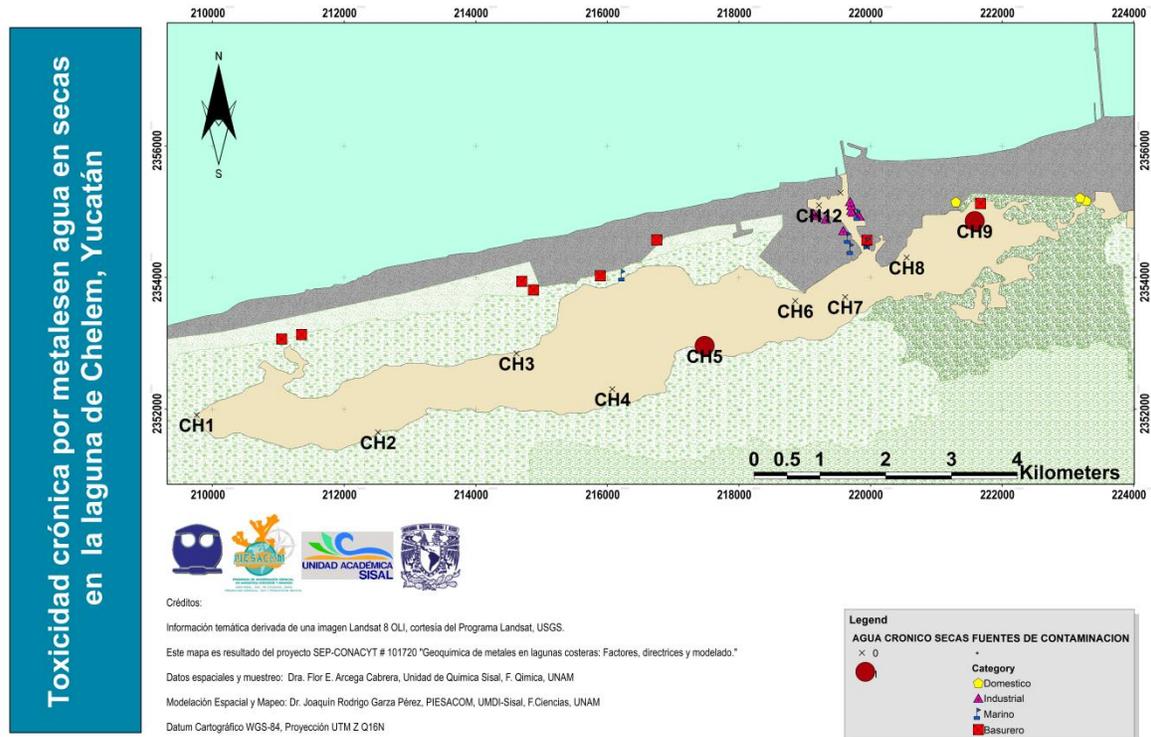


Figura 35. Toxicidad crónica por metales en agua en la temporada de secas. La estación 5 y 9 presentan concentraciones que rebasan valores de SQiRTs. Tomado de Arcega-Cabrera *et al.*, 2015.

Toxicidad crónica anual

En la figura 36 se puede observar que anualmente en todos los sitios las concentraciones de metales registrados rebasan valores recomendados por SQiRTs.

Las estaciones presentaron una mayor cantidad de metales son: la estación 1 con cinco metales (Pb, As, Cd, Cu y Ni), la estación 6 con cuatro metales (Pb, Cd, As y Ni), las estaciones 2 (Pb, Cd y Ni), 4 (Pb, Cd y Ni), 5 (Pb, As y Ni), 7 (Pb, Cd y Ni) y 9 (Pb, Ni y Cu) con tres metales y las estaciones 8, 10, 11 y 12 con dos metales (Pb y Ni para todos los sitios).

En general, el Pb y el Ni son los metales que rebasan en mayor medida los valores de SQiRTs y debido a sus altas concentraciones en la temporada de Nortes.

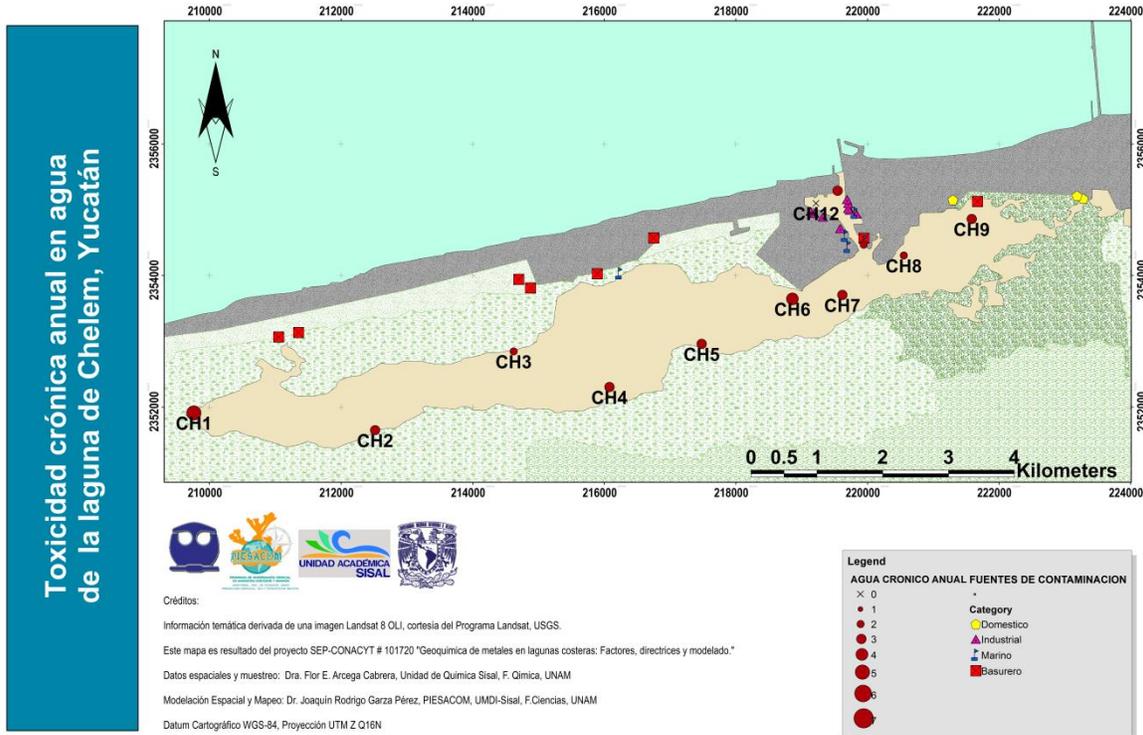


Figura 36. Toxicidad crónica anual en agua. En la estación 1 se registraron más metales que rebasaron el valor de norma. Tomado de Arcega-Cabrera *et al.*, 2015.

En resumen, la zona del puerto de abrigo, así como la parte media de la laguna son los sitios con mayor contaminación por metales y As a lo largo del año. Sin embargo, el resto de la laguna también presenta condiciones contaminantes dependiendo de la temporada, probablemente relacionado con procesos de aportes del acuífero e hidrodinámica de la laguna. Con base en esta información, la laguna de Chelem presenta un nivel de contaminación por metales y As que puede afectar potencialmente al sistema a mediano plazo.

Conclusiones

La salinidad, temperatura, pH, Eh y SS, mostraron una variación temporal significativa, asociada a los cambios hidrológicos e hidrodinámicos durante lluvias, Nortes y secas, esto muestra la alta variabilidad que existe en estos sistemas la cual puede repercutir directamente en la variación espacio temporal de los metales.

La profundidad y el %MO presentaron una variación significativa espacial relacionada con la morfología y las zonas de mayor productividad de la laguna. De igual forma, la presencia del material orgánico en la laguna influirá en la solubilidad, movilidad y disponibilidad de los metales en agua y sedimento de la laguna de Chelem, lo cual puede tener efectos en el ecosistema.

El As, Cr y Ni, que son elementos considerados potencialmente tóxicos, presentaron una variación en sedimentos dirigida por los cambios temporales.

El Pb y Cd, que también son elementos considerados potencialmente tóxicos, además del Cu, presentaron variaciones significativas espaciales en el sedimento de la laguna, probablemente relacionada con la variación geoquímica y los aportes a la zona.

Respecto al riesgo potencial para los estadios tempranos de la fauna bentónica tenemos que el As, Cd, Cu, Ni y Sn en sedimento rebasan los límites establecidos por los SQuiRTs. El caso especial del As alcanza una concentración que señala un probable efecto evidente en bivalvos. Para el Cu, la concentración alcanzada señala un probable efecto evidente en larvas de ostras.

En Nortes se presentó el mayor número de metales rebasando los límites señalados por el criterio de SQuiRTs con el siguiente orden de concentración $As < Cd < Cu < Ni < Sn$. Ante esta situación se sugiere se tomen acciones preventivas durante esta particular época del año para evitar daños probables a la salud humana por consumo de organismos con elevada concentración de estos elementos.

La variación de As, Cd, Cr, Ni, Pb y Sn en agua fue significativa temporalmente indicando una influencia importante de la variación hidrológica en la concentración de metales en la laguna, probablemente relacionada con aportes del acuífero.

De igual manera que para los sedimentos, en Nortes se presentó el mayor número de metales en agua rebasando los límites señalados por el criterio SQuiRTs con el siguiente orden de concentración $Pb < Ni < Cd < As < Cr$. Nuevamente se sugieren se tomen acciones preventivas durante esta particular época del año para evitar daños probables a la salud humana por consumo de organismos con elevada concentración de estos elementos.

La laguna de Chelem de acuerdo con el presente estudio, presenta un nivel significativo de contaminación por metales y As que de acuerdo con los criterios de SQuiRTs representa un riesgo potencial para los estados tempranos de la fauna bentónica y acuática, especialmente durante la temporada de Nortes.

Derivado de las importantes conclusiones de este trabajo se presenta el siguiente apartado para apoyar la prevención y minimización de la contaminación por metales y As en la laguna de Chelem.

Análisis del marco jurídico-administrativo para la disminución y prevención de la contaminación por metales y fortalecimiento de estrategias de manejo en la laguna costera de Chelem, Yucatán

De los derechos constitucionales

La laguna de Chelem brinda importantes servicios ambientales y bienes. A la par de estos beneficios, se han realizado acciones que comprometen el estado de la laguna e inclusive la salud de la población. Es importante en términos ecológicos y sociales el estado sano de la laguna, ya que, desde la perspectiva social, es un derecho constitucional. Hago alusión al artículo 4 ° párrafo quinto de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (CPEUM) que enuncia de la siguiente manera este derecho:

Artículo 4 párrafo quinto (DOF¹⁴ 08-02-2012).- *“Toda persona tiene derecho a un medio ambiente sano para su desarrollo y bienestar. El Estado garantizará el respeto a este derecho. El daño y deterioro ambiental generará responsabilidad para quien lo provoque en términos de lo dispuesto por la ley.*

No sólo en la CPEUM se contempla este principio ya que la Constitución Política del Estado de Yucatán (CPEY) hace una réplica de este derecho:

Artículo 86 párrafo 4. *El Estado, por medio de sus Poderes Públicos, garantizará el respeto al derecho humano de toda persona de gozar de un ambiente ecológicamente equilibrado y la protección de los ecosistemas que conforman el patrimonio natural de Yucatán, basado en los siguientes criterios:*

I.- Las personas en el Estado tienen derecho a vivir en un ambiente saludable que les permita una vida digna, y a hacer uso racional de los recursos naturales con que cuenta la Entidad, para alcanzar el desarrollo sostenido, en los términos que señale la Ley de la materia.

Pero, con resultados obtenidos de altas concentraciones de metales y con los antecedentes de degradación y contaminación de la laguna de Chelem, se transgreden estos derechos constitucionales.

Ahora bien, si aspectos ambientales y sociales se integran con aspectos económicos, se pueden llevar a cabo actividades integradas que permitan un aprovechamiento sustentable¹⁵

¹⁴ Diario Oficial de la Federación: es el órgano del Gobierno Constitucional de los Estados Unidos Mexicanos, que tiene la función de publicar en el territorio nacional: leyes, reglamentos, acuerdos, circulares, órdenes y demás actos expedidos por los poderes de la Federación, a fin de que éstos sean observados y aplicados debidamente en sus respectivos ámbitos de competencia.

¹⁵ Aprovechamiento sustentable: aquel aprovechamiento en el que el proceso de enajenación (extracción, transformación, o valoración) de una parte de los recursos naturales permite, posibilita o directamente promueve la recuperación de ésta, de modo que garantiza la renovación y permanencia en el largo plazo, o su resarcimiento, de los componentes enajenados (INECC, 2007).

y con ello alcanzar un desarrollo sustentable¹⁶. La CPEUM contempla el desarrollo sustentable en el artículo 25:

Artículo 25 (DOF 28-06-2013).- *Corresponde al Estado la rectoría del desarrollo nacional para garantizar que éste sea integral y sustentable, que fortalezca la Soberanía de la Nación y su régimen democrático y que, mediante la competitividad, el fomento del crecimiento económico y el empleo y una más justa distribución del ingreso de la riqueza, permita y la dignidad de los individuos, grupos y clases sociales, cuya seguridad protege esta Constitución.*

El desarrollo sustentable es entonces, la meta y el proceso que permitiría que los problemas de contaminación que presenta la laguna de Chelem, sean tratados desde una perspectiva integral. Para ello es necesario considerar las actividades tradicionales, culturales y económicas de la población.

En el presente trabajo ya se detectó que existe un problema asociado a la contaminación por metales (tomando como referencia los criterios de SQuiRTs). Con ello se busca ser una base para la integración de más aspectos y acciones que encausen el desarrollo sustentable. Por eso se integró esta sección, que si bien, es un acercamiento somero, permite visualizar las acciones jurídico-administrativas que son esenciales para la disminución y control de los metales.

Convenios internacionales en los que participa México en materia de metales

Debido a la alta toxicidad y a los efectos adversos de metales en la salud humana y en el ambiente, se cuentan con esfuerzos internacionales en atención a este problema.

- **Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE¹⁷), 1990.** En 1990, el Consejo de la OCDE adoptó la Decisión/Recomendación para la Cooperación en la Investigación y la Reducción de Riesgos de las Sustancias Químicas existentes [C(90) 163/Final]. Esta Acta del Consejo de la OCDE trata de la reducción de riesgos de sustancias químicas al ambiente, o que dañen la salud de la población o los trabajadores. Se basa en la premisa de la cooperación internacional en actividades de reducción de riesgos que favorezcan los aspectos institucionales y técnicos del manejo de riesgos en los países miembros al compartir esfuerzos y reducir la duplicación de éstos. Dentro de la OCDE se manejan cuatro sustancias, tres de las cuales son metales pesados: Cd, Hg, Pb.

¹⁶ El desarrollo sustentable es el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades.

¹⁷ La Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico es una Organización intergubernamental que reúne a 34 países comprometidos con las economías de mercado y con sistemas políticos democráticos, que en su conjunto representan el 80% del PIB mundial. La OCDE es una Organización en la que los países compararan, intercambian experiencias en políticas públicas, identifican mejores prácticas, promueven decisiones y recomendaciones, y mediante esos y otros instrumentos legales, acuerdan y se comprometen con estándares de alto nivel técnico y avanzada voluntad política.

- **Grupo de Trabajo para la Selección de Sustancias Químicas de la Comisión de la Cooperación de América del Norte.** Este grupo de trabajo, el cual forma parte del Grupo de Trabajo de Manejo Adecuado de Sustancias Químicas (MASQ) está trabajando para la nominación del Pb como sustancia para la cual se tomen acciones para su control en Canadá, Estados Unidos y México.
- **Declaración para la Reducción de Riesgos por Plomo, 1996.** Esta declaración fue adoptada por los gobiernos de los países miembros de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE) en la reunión del Comité de Políticas Ambientales a nivel Ministerial (INECC, 2009).
- **Convenio internacional sobre el control de los sistemas antiincrustantes perjudiciales en los buques, 2001. OMI.** En el Convenio fue adoptado por los estados miembros de la Organización Marítima Internacional (OMI) en el que se prohíbe el empleo de compuestos orgánicos del Sn perjudiciales en las pinturas antiincrustantes en los buques, y se establece un mecanismo para evitar el posible uso futuro de otros productos en los sistemas antiincrustantes.

¿A quién le corresponde la jurisdicción de la laguna de Chelem?

En primera instancia la laguna de Chelem es propiedad de la Nación (artículo 27 de la CPEUM¹⁸), sujeta al régimen de dominio público federal (artículo 6 de LGB y de jurisdicción federal (artículo 3 inciso b y artículo 36 fracción V de LFM) clasificada como parte de las aguas Marinas Interiores.

Instituciones Federales, competencias y atribuciones

Chelem como bien nacional y de jurisdicción federal, queda sujeta a cargo de CONAGUA¹⁹ (artículo 113 de LAN). La CONAGUA tiene la atribución de fungir como autoridad en la calidad del agua, fomentar y apoyar el desarrollo del tratamiento y reúso de aguas (artículo 9 fracciones I y XIV respectivamente de LAN). Así mismo tiene a su cargo establecer y vigilar el cumplimiento de las condiciones particulares de descarga que deben satisfacer las aguas residuales a los bienes de jurisdicción federal y bienes nacionales (artículo 86 fracción V inciso a y b de LAN). En este caso, se identificó el aporte de aguas residuales al sistema y contaminación por residuos en el área aledaña y por ello deben realizarse labores de remoción y limpieza de contaminantes en la laguna y dar aviso a CONAGUA. Si no se da aviso a la CONAGUA, esta deberá realizar labores pero

¹⁸ Para leer los artículos completos de la sección “Posibles soluciones para la disminución y control de la contaminación por metales en la laguna costera de Chelem desde la perspectiva del marco jurídico-administrativo” así como su reforma remítase al ANEXO 2.

¹⁹ CONAGUA: La Comisión Nacional del Agua es un órgano Administrativo Desconcentrado de la SEMARNAT, con funciones de Derecho Público en materia de gestión de las aguas nacionales y sus bienes públicos inherentes, con autonomía técnica, ejecutiva, administrativa, presupuestal y de gestión, para la consecución de su objeto, la realización de sus funciones y la emisión de los actos de autoridad.

posteriormente los responsables cubrirán estos costos después de los 30 días siguientes a su notificación (artículo 88 BIS I párrafo sexto de LAN). Por el simple hecho de descargar aguas residuales que causen contaminación, se debe asumir la responsabilidad de reparar o compensar el daño (artículo 96 BIS 1 de LAN).

La SEMARNAT debe de realizar un sistemático y permanente monitoreo para detectar la presencia de contaminantes y aplicar las medidas que procedan (artículo 133 de LGEEPA).

La PROFEPA²⁰ también tiene injerencia en este tema y tiene la atribución (artículo 14 BIS 4 fracciones IV y IX de LAN) de promover acciones de reparación o compensación del daño, así como la conservación, preservación, protección y restauración, debido a que la calidad del agua es asunto de seguridad nacional.

Aspectos legislativos

En el presente trabajo se tomaron como referencia criterios de la NOAA (límites de SQUIRTs) para considerar un umbral de concentraciones de metales y As. Esto derivado de la falta de criterios o normas mexicas que se puedan tomarse como referencia para identificar la contaminación por metales en ecosistemas costeros. La legislación mexicana solo contempla en tema de metales la NOM-001-SEMARNAT-1996 que establece los límites máximo permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Si bien, hay aporte de descarga de aguas residuales al sistema, hubiera sido incorrecto que se considerara esta NOM, ya que el presente trabajo no se enfoca en determinar si las descargas de aguas residuales que llegan a la laguna cumplen con dichos criterios. Así mismo, hubiera sido incorrecto considerar esta NOM, debido a aportes de metales al sistema por otras fuentes como los basureros clandestinos ubicados en el área del manglar y actividades marítimo-portuarias por citar algunas. Sería conveniente en esta materia consolidar un campo de regulaciones más amplio que no solo beneficien a la laguna de Chelem, si no en general a los ecosistemas costeros mexicanos, esto es debido a su importancia ambiental, económico y social. En este caso, la SEMARNAT²¹ tiene la atribución de emitir NOM²² en materia ambiental con el objetivo de establecer requisitos, especificaciones, condiciones, procedimientos, metas, parámetros y límites permisibles que deberán de observarse en zonas costeras y/o ecosistemas costeros (artículo 36 fracciones I y II de LGEEPA).

²⁰ PROFEPA: La Procuraduría Federal de Protección al Ambiente, es un órgano administrativo desconcentrado de la SEMARNAT con autonomía técnica y operativa.

²¹ SEMARNAT: La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales es la dependencia del gobierno federal encargada de impulsar la protección, restauración y conservación de los ecosistemas y recursos naturales y bienes y servicios ambientales de México, con el fin de propiciar su aprovechamiento y desarrollo sustentable.

²² NOM: Las Normas Oficiales Mexicanas son regulaciones técnicas de observancia obligatoria expedidas por dependencias de la administración pública Federal, que establecen reglas, especificaciones, atributos, directrices, características o prescripciones aplicables a un producto, proceso, instalación, sistema, actividad, servicio o método de producción u operación, así como aquellas relativas a terminología, simbología, embalaje, mercado o etiquetado y las que se refieran a su cumplimiento o aplicación.

En materia de residuos

En campo se observó la presencia de residuos de manejo especial y principalmente de residuos sólidos urbanos que son fuentes de metales a la laguna, (definidos así por la LGPGIR en el artículo 5 fracciones XXX y XXXIII respectivamente). El estado de Yucatán tiene la facultad del manejo de los residuos de manejo especial (artículo 9 de LGPGIR) lo que le correspondería el manejo de las pilas y los neumáticos usados, los cuales deben ser sometidos a un manejo integral (artículo 80 LGIREY). Sin embargo, los residuos sólidos urbanos son los que tuvieron una mayor presencia (envases y empaques). Yucatán cuenta con su propia ley de Gestión Integral de Residuos la cual da atribuciones al poder ejecutivo a través de la SEDUMA y a los Ayuntamientos (artículo 7 de La Ley para la Gestión Integral de Residuos en el Estado de Yucatán).

En LGIREY se estipula que el Estado debe regular y establecer las bases para el cobro por la prestación de servicios de manejo integral de residuos de manejo especial. Estos cobros son para ser destinados en el fortalecimiento de la infraestructura (artículo 8 fracción XX). Los Ayuntamientos tienen la atribución de regular los residuos sólidos, su gestión integral y la remediación de sitios contaminados por estos (artículo 9 fracción I) e influir en la innovación de procesos, métodos y tecnologías para lograr un manejo integral de los residuos que sea económicamente factible (artículo 9 fracción V). Se habla de las obligaciones de los generadores de residuos sólidos y de manejo especial (artículo 27) en el cual una obligación importante es separar y almacenar los residuos (artículo 27 fracción I). La presencia de residuos en el área aledaña de manglar y su quema a cielo abierto está prohibido (artículo 31 fracción I II). La SEDUMA establecerá los lineamientos y tomará las medidas necesarias para la remediación de los sitios contaminados (artículo 87). En el caso de que no sea posible identificar al responsable de la contaminación por residuos, las autoridades estatales y municipales coordinadamente llevarán a cabo las acciones necesarias para su remediación (artículo 88).

Progreso cuenta con el Reglamento de limpia del Municipio de Progreso, el cual regula la prestación del servicio de limpia pública. En el artículo 24 de dicho reglamento, se estipula que corresponde a los habitantes colaborar en el sistema de limpia pública, principalmente no tirando residuos, escombros, ni sus similares, en las orillas de carreteras y caminos. Deben de contarse con contenedores y deben ser recolectados (artículo 4 fracción III). Probablemente, las malas prácticas del manejo de los residuos se deban a la falta de contenedores y una deficiente colecta.

En el tema de aguas residuales, el artículo 115 fracción III inciso a, enuncia que los municipios tendrán a su cargo las funciones y servicios públicos de agua potable, drenaje, alcantarillado, tratamiento y disposición de sus aguas residuales. En el Estado de Yucatán, la Junta de Agua Potable y Alcantarillado de Yucatán²³ (JAPAY) tiene por objeto la administración, operación, conservación, ampliación y construcción de los sistemas de agua potable y alcantarillado.

²³ La Junta de Agua Potable y Alcantarillado es un organismo público descentralizado, dotado de capacidad y personalidad jurídica propias, con disposiciones en el orden de lo público y de observancia general, y que tiene por objetivo la administración, operación, conservación, ampliación y construcción de los sistemas de agua potable y alcantarillado.

Las descargas de aguas residuales domésticas deben ser vertidas a fosas sépticas o algún sistema de recolección, que cuente con el tratamiento que garantice la reducción de contaminantes del agua residual (artículo 151 del RLPAEY). Las aguas residuales domésticas tratadas mediante fosas sépticas, deberán ser vertidas a campos de absorción o irrigación o a pozos de absorción cuya profundidad esté entre tres y cuatro metros sobre el manto freático del lugar. Cuando esto no sea posible, las aguas deberán ser sometidas a algún otro método de tratamiento con eficiencia similar a los sistemas descritos o ser dispuestas de tratamiento con eficiencia similar a los sistemas descritos o ser dispuestas en pozos con la profundidad adecuada (artículo 152 fracción X de RLPAEY).

De la actividad marítimo-portuaria

Se obtuvo en el presente trabajo que uno de los principales puntos de emisión de metales a la laguna es por la actividad marítimo-portuaria. Por ejemplo, en la manifestación de impacto ambiental (MIA) de la construcción y operación de la “Marina Paraíso Yucalpetén,” hace mención a la atención de los residuos que se generen así como de la disposición de las aguas residuales (en atención al artículo 47 del RLP). En la MIA dice que los residuos se ubicaran en recipientes con tapa para su contención y que posteriormente su disposición final será el basurero de Progreso. Las aguas residuales se dispondrán en cisternas sanitarias para su contención para ser retiradas después por una empresa. El tratamiento de los residuos y aguas residuales deben de ser obligatorios en la elaboración de la MIA y así lo plantean en el proyecto, pero el aporte de metales puede deberse a que el tratamiento no es adecuado o que existen otras fuentes que no están siendo reguladas.

De lo anteriormente planteado, se puede concluir que, es necesario atender prioritariamente la problemática de los residuos y de las aguas residuales que son los que juegan un papel importante en el aporte de metales a la laguna. Se cuentan con los mecanismos regulatorios para atender el problema esta problemática pero no surten efectos. Por ello, se plantea la realización de encuestas y entrevistas dirigidas a los habitantes para identificar las áreas de oportunidad a fortalecer y posteriormente, encaminar acciones para lograr el manejo adecuado y efectivo de los residuos (agua y sólidos). La SEMARNAT ente ámbito, tiene la atribución de concertar acciones e inversiones con los sectores social y privado y con instituciones académicas, grupos y organizaciones y personas físicas y morales interesadas, para la preservación y restauración del equilibrio ecológico y la protección al ambiente.

Educación ambiental y “conciencia ambiental”

La educación ambiental está definida en la LGEEPA como: *Proceso de formación dirigido a toda la sociedad, tanto en el ámbito escolar como en el ámbito extraescolar, para facilitar la percepción integrada del ambiente a fin de lograr conductas más racionales a favor del desarrollo social y del ambiente. La educación ambiental comprende la asimilación de conocimientos, la formación de valores, el desarrollo de competencias y conductas con el propósito de garantizar la preservación de la vida* (artículo 3 fracción XXXVIII).

En este ámbito, la SEMARNAT tiene la atribución de impulsar el fortalecimiento de la conciencia ecológica, a través de la realización de acciones conjuntas con la comunidad para la preservación y mejoramiento del ambiente y el correcto manejo de desechos. Para ello, la SEMARNAT podrá en forma coordinada con el Estado de Yucatán y el Municipio de Progreso, celebrar convenios de concertación con la comunidad urbana y rural, así con diversas organizaciones sociales (artículo 158 fracción V de LGEEPA).

En la LPMAEY el capítulo VII está dedicado a la investigación y educación ecológica. En LGIREY también se dedicó un capítulo (capítulo IV) a la educación, difusión y participación social. La SEDUMA²⁴, en coordinación con las autoridades educativas, promoverá la incorporación de contenidos ecológicos y ambientales en programas de estudio de todos los niveles, particularmente el básico, así como la formación de cultura ambiental en la población, enfatizando las características y condiciones ecológicas del Estado (artículo 22 de LGIREY). La SEDUMA tiene la atribución de realizar campañas de educación permanentes dirigidas a la población en general, tendientes a desalentar el uso indiscriminado de productos tóxicos y contaminantes, considerados en la NOM (artículo 49 de LPMAEY).

Programa de Ordenamiento Ecológico del Territorio Costero del Estado de Yucatán (POETCY) como parte de las posibles soluciones

En esta sección se toma en consideración el POETCY²⁵ que es un instrumento de política ambiental para el desarrollo sustentable. Este instrumento es una base para las soluciones de prevención y minimización de la contaminación por metales. Así mismo, es considerado para la identificación de actividades y usos compatibles e incompatibles para que la propuesta sea congruente con las características de la laguna.

Unidades de Gestión Ambiental y política

Las Unidades de Gestión Ambiental (UGA) que corresponden a la laguna son PRO14-LAG, PRO15-LAG y PRO16-LAG. Aledañas a la laguna son PRO18-MAN con área de manglar y las pertenecientes al área urbana PRO6-BAR, PRO7-BAR, PRO8-BAR y PRO10-BAR y PRO9-BAR que corresponde a la actividad portuaria (ver Unidades de Gestión Ambiental Progreso en el ANEXO 3).

Las actividades y usos del suelo que se realizan actualmente en el área de la laguna (UGA PRO14-LAG, PRO15-LAG y PRO16-LAG), son compatibles con las actividades y usos del suelo propuestos en el POETCY. Actualmente, se llevan a cabo actividades de conservación, pero estas deben atenderse y reforzarse debido al estado actual de contaminación y degradación. La UGA PRO16-LAG en el apartado de política indica que debe ser restaurada, pero se permite el aprovechamiento sustentable de baja intensidad. La

²⁴ SEDUMA: Secretaría de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente

²⁵ POETCY: Es un instrumento de planeación jurídica, basado en información técnica y científica, que determina esquemas de regulación de la ocupación territorial que maximice el consenso entre los actores sociales y minimice el conflicto sobre el uso del suelo. Contiene la regionalización ecológica del territorio costero del Estado de Yucatán. Identifica áreas de atención prioritaria y áreas de aptitud sectorial, conforme a las disposiciones contenidas en el Reglamento de la LGEEPA en materia y tomando en consideración los criterios que se establecen en el artículo 20 de la misma.

política de la UGAPRO14-LAG es de conservación y permite el aprovechamiento de muy baja intensidad. En la UGA PRO15-LAG la política es de aprovechamiento sustentable de baja intensidad. Para las mismas tres UGA que corresponden exclusivamente a la laguna, se aplica el mismo criterio de regulación ecológica número 60 el cual enuncia: *no se permiten las descargas de aguas residuales de cualquier tipo*. Pero se observó en campo la evidencia de descargas de aguas residuales. Es posible realizar descargas de aguas residuales domésticas a este tipo de sistemas siempre y cuando estas se sujeten a las NOM y presenten un aviso escrito a la CONAGUA (artículo 88 BIS I de LAN) pero en este caso no se puede realizar este mecanismo porque el POETCY no permite descargas de aguas residuales en la laguna de Chelem.

En la UGA PRO18-MAN que comprende el área del manglar, la política del POETCY está orientada a la conservación. En este caso, resulta relevante la atención al área de manglar ya se detectaron residuos quemados, y predominantemente latas, baterías y plásticos. La presencia de este tipo de residuos en el manglar también es una fuente de aporte de metales a la laguna. En el criterio ecológico 66 se expresa claramente la prohibición de la disposición final de residuos sólidos urbanos, industriales, de manejo especial y peligrosos.

La UGA PRO07-BAR es un área inmediata a la laguna y de influencia. La política de esta UGA es de aprovechamiento sustentable de baja intensidad, que si bien, algunas de las actividades y usos del suelo actuales son compatibles, se lleva a cabo la disposición final de residuos sólidos urbanos. Esta disposición final de residuos, está considerada en el POETCY como actividad no compatible. Son necesarias las acciones inmediatas de remoción de los residuos, no solo por ser una fuente de metales sino que también esta contaminación puede causar afectaciones mayores.

En la UGA PRO10-BAR, una de las actividades destacadas que se lleva a cabo es la ganadería estabulada (bovinos, porcinos y aves). Esta actividad en específico, es una fuente de aporte de As (El As se utiliza como aditivo alimentario de aves y cerdos). Resulta necesario observar y plantear el manejo de los desechos de la ganadería.

Plan Estatal de Desarrollo Yucatán 2012-2018

El Plan Estatal de Desarrollo de Yucatán en el área de medio ambiente se plantea disminuir la degradación ambiental considerando que el tema más urgente es el manejo integral de los residuos. De acuerdo con este Plan, el estado cuenta con 22 sistemas de drenaje y alcantarillado, cubriendo a cuatro municipios con dicho servicio, comprendiendo a Mérida, Progreso, Ticul y Umán. El 86.3% de los sistemas de alcantarillado y drenaje se concentra en Mérida. Por lo que hay un déficit de cobertura. Sin embargo, este Plan de Desarrollo plantea que el Municipio de Progreso cuenta con una cobertura de drenaje ya sea conectado a la red pública y/o fosa séptica así como recolección domiciliaria o contenedor o basurero público en más del 90% de las viviendas habitadas. Considerando lo anterior, Progreso cuenta con un índice de sustentabilidad de gestión de los residuos de 0.72-0.94. Este índice nos estaría indicando servicios eficientes en manejo de residuos y disposición final de aguas residuales, pero los resultados obtenidos nos demuestran lo contrario.

Atención y fortalecimiento de las Estrategias de manejo

La información obtenida en el presente trabajo así como de la exhaustiva revisión del marco jurídico aplicable, permite identificar las estrategias de manejo que deben reforzarse para la atención de la contaminación por metales:

La “estrategia de planeamiento y regulación del uso del suelo a nivel nacional o provincial (estatal)” es atendida por el decreto-POETCY. El POETCY no resuelve el problema de la contaminación, puesto que, los criterios ecológicos a los que se deben de apegar las actividades y usos de suelo se *transgredieron*. Que si bien, el POETCY menciona los usos compatibles, la realidad actual se traduce en elevadas concentraciones de metales debido a acciones incompatibles y de mal manejo.

Las características inherentes de la laguna y las actividades socioeconómicas que se llevan a cabo, así como su favorable ubicación, hacen que sea deseable en un futuro nuevos desarrollos. Para ello, es necesario que las estrategias y medidas de mitigación que deriven de los desarrollos, los esfuerzos también se dirijan en evitar los procesos de contaminación. Por lo anterior, se debe de fortalecer la estrategia de “evaluación de impactos ambientales de propuestas de desarrollo costero”.

Una estrategia que puede resultar efectiva (siempre y cuando la inspección y vigilancia también sea reforzada) es la estrategia de “atención de área crítica” puesto que la laguna de Chelem es parte del polígono de la “Reserva Estatal Ciénagas y Manglares de la Costa Norte de Yucatán²⁶”. Esta Área Natural Protegida resulta de la atención de protección, conservación y preservación de dichos ecosistemas costeros.

Finalmente, se plantea el fortalecimiento de la estrategia “lineamientos guía y regulaciones obligatorias” en la atención de normar en materia de concentración de metales en agua y sedimento en ecosistemas costeros y/o humedales costeros.

Propuestas para la disminución y control de concentración de metales para la laguna de Chelem, Yucatán:

1. Aspectos legislativos

Expedir NOM en relación a la contaminación por concentraciones de metales en ecosistemas costeros.	SEMARNAT
--	----------

2. Aspectos político-administrativos

Prevenir la contaminación	SEDUMA
---------------------------	--------

Impulsar el uso de materiales que cumplan con criterios de eficiencia ambiental y	SEMARNAT
---	----------

²⁶ Decretada el 19 de marzo de 2010.

tecnológica.

Divulgar la minimización de residuos.

SEDUMA

Mejorar tecnología e infraestructura para el adecuado manejo de los residuos.

Gobierno del Estado de Yucatán

Mejorar y eficientizar los sistemas de colecta y disposición de los residuos.

Municipio de Progreso

Realizar un plan de manejo de los residuos de manejo especial (como pilas y acumuladores).

SEDUMA

Vigilar el cumplimiento del Reglamento de Limpia del Municipio de Progreso.

Comisión de Limpia Pública Municipal

Remediar los sitios aledaños a la laguna (primordialmente el área de manglar) en los que se encontraron tiraderos clandestinos de residuos sólidos urbanos.

SEDUMA y Ayuntamiento del Municipio de Progreso

“Integrar los desagües²⁷” (que desembocan directo a la laguna) en el sistema de alcantarillado municipal.

Municipio de Progreso y JAPAY

Realizar actividades de remoción y limpieza de los contaminantes de la laguna junto con la comunidad.

CONAGUA

Realizar monitoreo de la calidad del agua.

SEMARNAT

Mayor atención a la problemática del estado actual de la laguna de Chelem.

CONAGUA

En el aspecto de la educación ambiental, integrar temas de prevención, protección y conservación ambiental en los programas de estudio en todos los niveles.

Gobierno del Estado de Yucatán y autoridades educativas del Estado de Yucatán

Realizar campañas de educación permanentes dirigidas a la población en general.

SEDUMA

²⁷ Se habla de una “integración de los desagües” ya que se busca que las aguas residuales domésticas que tienen como destino final la laguna de Chelem lleguen al sistema de alcantarillado ya que el POETCY no permite el vertido de aguas residuales de ningún tipo en la laguna.

Mayor atención en la ANP Reserva Estatal
Ciénagas y Manglares de la Costa Norte de
Yucatán (Inspección y vigilancia).

SEDUMA

3. Participación social

- Aportar información y opiniones para identificar las acciones particulares que provocan la contaminación.
- Evitar el uso o minimizar el uso de productos que contengan metales.
- Participar en actividades de limpieza y restauración.
- Asistir a las campañas de educación ambiental.
- Realizar denuncias ciudadanas cuando identifiquen actores que provoquen la contaminación y degradación.
- Separación de residuos desde casa, reciclar, reutilizar y reducir residuos.
- Depositar los residuos en los contenedores especiales.

Conclusiones:

La laguna de Chelem es un bien nacional que debe ser atendido a través de la federación, pero debido a temas que son atribución municipal y estatal que no han sido atendidas, se han presentado problemas relevantes de contaminación que afectan el equilibrio ecológico de la laguna, así como la salud de las personas. Incluso el PEDY reconoce la urgencia de atender la situación del manejo de los residuos sólidos. Ya se han estado llevando las acciones pertinentes para la creación del basurero municipal de Progreso, que es un gran avance para el manejo de los residuos. Si bien, se espera una importante participación de las instancias gubernamentales competentes para solucionar la situación actual, en miras del beneficio de la población, la misma población es la que está provocando alteraciones al ecosistema y por ende el perjuicio a su salud.

LITERATURA CITADA

Al-Ghadban, A., Jacob, P. y Abdali F. (1994). Total Organic Carbon in the sediments of the Arabian Gulf and Need for Biological Productivity Investigations. *Marine Pollution Bulletin*, 28 (6): 356-362.

Amado, A. y Jacob, S. (2007). Contact dermatitis to foods. *Actas Dermo-Sifiliográficas*, 98: 452-458.

Arcega-Cabrera, F., Armienta, M. A., Daesslé, L.W., Castillo-Blum, S. E., Talavera, O., Dótor, A. (2009). Variations of Pb in a mine-impacted tropical river, Taxco, México: Use of geochemical, isotopic and statistical tools. *Applied Geochemistry*. 24 (1): 162-171.

Arcega-Cabrera, F., Garza-Pérez, R., Noreña-Barroso E., Ocegüera-Vargas. (2015). Impacts of Geochemical and Environmental Factor son Seasonal Variation of Heavy Metals in a Coastal Lagoon Yucatan, Mexico. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 94 (1): 58-65.

Arcega-Cabrera, F., Garza-Pérez, R., Enríquez, C., Ocegüera-Vargas, I., Quesadas-Rojas, M., Tello, L., Mariño, I., Noreña-Barroso, E. (2014). Geoquímica de metales en lagunas costeras: factores directrices y modelado. Informe técnico. Ciencia básica-CONACYT clave 101720.

ATSDR. (2005). Estaño y compuestos de estaño. Disponible es. http://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts55.pdf. Consultado el 07/03/2016.

ATSDR. (2012). Cadmio. Disponible en: http://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts5.pdf. Consultado el 14/11/2013.

ATSDR. (2007). Toxicological Profile for Lead U. S. Department of Health and Human Services. Division of Toxicology. Atlanta Georgia. 2-17 pp.

Baird, C. (2001). Química ambiental. Editorial Reverté. Barcelona. 439 pp.

Barceloux, G. (1999). Chromium. *Clinical Toxicology*, 37 (2): 173-194.

Bridgewater, L., Manning, F., Woo, E., Patierno, S. (1994). DNA polymerase arrest by aducted trivalent chromium. *Mol. Carcinog*, 9: 122-133.

Bodek, I. (1988). Environmental Inorganic Chemistry. Properties, process and estimation methods. Pergamon Press, U. S. A. 7.8.1-78.9 pp.

Botello, A. y Paez-Osuna, F. (1986). El problema crucial: La contaminación Centro de Ecodesarrollo, Vol. I. Serie Medio Ambiente en Coatzacoalcos. 177 pp.

Botello A., Villanueva S. y Ponce G. (2010). Calidad del agua: un enfoque multidisciplinario. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México. 95 pp.

Buchman, M. (2008). NOAA Screening Quick Reference Tables, NOAA OR&R Report 08-1, Seattle WA, Office of Response and Restoration Division, National Oceanic and Atmospheric Administration. 34 pp.

Breton, Y., Brown, D., Davy, B., Haughton, M., Ovares, L. (2006). Manejo de recursos costeros en el Gran Caribe: resiliencia, adaptación y diversidad comunitaria. Mayol Ediciones. Bogotá, Colombia. 144-146 pp.

Byers, S., Mills, E., Stewart, P. (1978). A comparison of methods of determining organic carbon in marine sediments, with suggestions for a standard method. *Hydrobiologia*, 58 (1): 43-47.

Callender, E. (2004). Heavy metals in the environment- Historical trends. *Treatise on Geochemistry*, 9: 67-105.

Canto-Maza, W. y Vega-Cendejas, M. (2008). Hábitos alimenticios del pez *Lagodon rhomboides* (Perciformes: Sparida) en la laguna costera de Chelem, Yucatán, México. *Rev. Biol. Trop*, 56: 1837-1846.

Castro-González, M., Méndez-Armenta, M. (2008). Heavy metals: implications associated with the fish consumption. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 26 (3): 263-271.

Cepeda-González, M., Gold-Bouchot G., Montero-Muñoz, J., Zapata-Pérez, O. (2011). Integración de un libro sobre los estudios realizados sobre contaminantes orgánicos persistentes. Instituto Nacional de Ecología. México. 94-105 pp.

Chang, R. (1992). Química. McGraw-Hill. México. 1064 pp.

Colli, R. (2001). Diagnóstico de la salud de la salud ambiental de la laguna de Chelem. Tesis de Maestría. Instituto Tecnológico de Mérida, Yucatán, México. 160 pp.

CONABIO. (2006). Capital natural y bienestar social. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México. 71 pp.

Cullen, J. y Maldonado, M. (2013). Biogeochemistry of Cadmium and Its Release to the Environment en *Cadmium: From Toxicity to Essentiality*, 11: 31-62.

De Flora, S., Camoirano, A., Serra, D., Bennicelli C. (1989). Genotoxicity and Metabolism of Chromium Compounds. *Toxicol and Environmental Chemistry*, 19 (3-4):153-160.

De la Cruz-Landero, N., Chávez, A. Laffón, S. (2013). Acumulación de metales pesados en sedimentos del ecosistema manglar en Laguna de Términos, Campeche, México. Vol. 15. Xalapa, México. 25-30 pp.

Depault, F., Cojocar, M., Fortin, F., Chakrabarti, S., Lemieux, N. (2006). Genotoxic effects of chromium (VI) and cadmium (II) in human blood lymphocytes using the electron microscopy in situ end-labeling (EM-ISEL) assay. *Toxicology In Vitro*. 20 (4): 513-518.

Eisler, R. (2000). Handbook of Chemical Risk Assessment, Hazard to Humans, Plants and Animal. Edit. Lewis Publishers, U. S.A. Volume 2. 650 pp.

Espinosa, S. (2012). Procesos geoquímicos ambientales del arsénico, cadmio, plomo y zinc en sedimentos del Río Tolimán, Hidalgo, México. Tesis de doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México. 34 pp.

Forester, A.(1980). Monitoring the bioavailability of toxic metals in acid-stressed shield lakes using pelecypod molluscs (clams, mussels). In: *Hemphill, D.D. Trace Substances in Environmental Health XIV*. Curators of the University of Missouri, Columbia, Missouri. 142-147 pp.

García, E. (1973). Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). Instituto de Geografía UNAM. 71 pp.

García, D., Xool, K., Euán, A. J., Munguía, G., Cervera, M. (2011). La costa de Yucatán en la perspectiva del desarrollo turístico. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Edición 9. México D. F. 45-54 pp.

Gauglhofer, J. y Bianchi, V. (1991). Chromium. In *Metals and their compounds in the environment, occurrence, analysis and biological relevance*. U. S. A. 115 pp.

Girasolo, M., Di Salvo, C., Schillaci, D., Barone, G., Silvestri, A., Ruisi, G. (2005). Synthesis, characterization, and in vitro antimicrobial activity of organotin (IV) complexes with triazolo-pyrimidine ligands containing exocyclic oxygen atoms. *Journal of Organometallic Chemistry*, 60 (21-22): 4773-4783.

Goyer, R. (1997). Toxic and essential metal interactions. *Annual Review of nutrition*,71: 52-59.

Hamilton, J. y Wetterhahn K. (1988). Chromium. Handbook on Toxicity of Inorganic Compounds. Edit. Seiler, H. G. and Sigel, H. Marcel Dekker, Inc. New York. 239-250 pp.

Hastenrath, S.(1991). Climate Dynamics of the Tropics. Edit. Kluwer Academic Press. 488 pp.

Hernández V. (2002). Estructura de la comunidad y ensamblaje de peces juveniles, en la laguna de Chelem, Yucatán (Nortes-Secas). Benemérita Univ. Autónoma de Puebla. Escuela de Biología. México.

Hwalla, N., Itani, L., Nabhani-Zeidan, M., Naja, F., Nashalian, O., Masreddine L., Parent-Massin, D. (2010). Dietary exposure to essential and toxic trace elements from a total diet study in an adult Lebanese urban population. *Food and Chemical Toxicology*, 48: 1262-1269.

Herrera-Silveira J. (2006). Lagunas Costeras de Yucatán (SE México): Investigación, Diagnóstico y Manejo. *Ecotrópicos*, 19: 94-108.

Herrera-Silveira J. (1995). Biodiversidad de productores primarios de lagunas costeras del norte de Yucatán, México. Comisión Nacional para el uso y conocimiento de la biodiversidad CONABIO.

Herrera-Silveira, J., Ramírez, J., Zaldivar. (1998). Overview and characterization of the hydrology and primary producer communities of selected coastal lagoons of Yucatan, México. *Aqua. Ecosyst. Health Manag.*

Herrera-Silveira y Morales Ojeda. Lagunas costeras en Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán. (2010). CICY, PPD-FMAM, Conabio, Seduma. Mérida, Yuc. 24-26 pp.

Herrera-Silveira, J., Morales-Ojeda S. y Cortes-Balan, T. (2011). Eutrofización en los ecosistemas costeros Del Golfo de México: V.1. SEMARNAT-NOAA-GEF-UNIDO. 72-75 pp.

Hoffman, R., Nelson, L., Howland, M., Lewin, N., Goldfrank, L. (2007). Manual toxicologic emergencies. Connecticut.aplpleton and Lange, Mc Graw-Hill. E. U. A.

Hagenfeldt, L., Arvidsson, A., Larsson, A. (1978) Glutathione and gammaglutamylcysteine in whole blood, plasma and erythrocytes. *Clin Chim*, 85: 167.

Hutchinson, T. y Stokes P. (1975). Heavy metal toxicity and algal bioassays. In: *Water quality parameters*. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA. 320-343 pp.

INECC. (2009). Metales pesados. Disponible en: <http://www.inecc.gob.mx/sqre-temas/763-aqre-metales>. Consultado el 01/03/2016.

INECC. (2007). Aprovechamiento: Impacto y sustentabilidad. Disponible en: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/398/aldama.html>. Consultado el 03/03/2016.

INEGI. (1999). Anuario Estadístico de los Estados Unidos Mexicanos 1988-1989. Instituto Nacional de Estadística, Geografía.

INEGI. (2000). Diccionario de datos climáticos. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México. 57 pp.

Jurap, L. (2003). Hazards of heavy metal contamination. *British medical Bulletin*, 68: 167-182.

Katz, S. y Salem, H. (1993). The toxicology of chromium with respect to its chemical speciation: a review. *J Appl. Toxicol*, 13: 217-224.

Kapur, K. y Yadav N. (1982). The effects of certain heavy metals salts on the development of eggs in common carp, *Cyprinus carpio* var. *communis*. *Acta Hydrochim. Hydrobiology*, 10: 517-522.

Keller, A. y Zam, S. (1991). The acute toxicity of selected metals to the freshwater mussel, *Anodonta imbecilis*. *Environmental Toxicologic. Chemistry*, 10: 539-546.

Kunz, A. y Wilson F. (2000). Complexation and adsorption of copper in raw sewage. *Water research*, 34 (7): 2061-2068.

Lenntech. (2008). Cobre. Propiedades químicas del Cobre: Efectos del cobre sobre la salud. Efectos ambientales del cobre (en línea). Disponible en <http://www.lenntech.com/espanol/tabla-periodica/cu.htm>. Consultado el 12/05/2015.

Lewis, A. y Cave, W. (1982). The biological importance of copper in oceans and estuaries. *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review*, 10: 471-695.

Lippard, S. y Berg, J. (1994). Principles of bioinorganic chemistry. University Science Books: Mill Valley. 411 pp.

Loring D. y Rantala R. (1992). Manual for the geochemical analyses of marine sediments and suspended particulate matter. *Earth-Science Reviews*, 32 (4): 235-283.

Marín-Guirao, L., y Javier Lloret, A. (2008). Carbon and nitrogen stable isotopes and metal concentration in food webs from a mining-impacted coastal lagoon. *Science of the Total Environment*, 393 (1): 118-130.

Martin, M., Osborn, P. Billig y Glickstein N. (1981). Toxicities of ten metals to *Crassostrea gigas* and *Mytilus edulis* embryos and *Cancer magister* larvae. *Mar. Pollut. Bull.* 12(9): 305-308.

Miloslavich P., Penchaszadeh, P., Bigatti, G. (2007). Impossex en gastrópodos de Venezuela. *Ciencias Marinas*. 33 (3): 319-324.

Moreno C., (2011). Alteraciones neuroconductuales y neuroquímicas en el ratón CD1 por exposición crónica al Arsénico. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.

- Nishio, A. y Uyeki, E. (1985) Inhibition of DNA synthesis by chromium compounds. *J. Toxicol. Environ. Health*, 15: 237-244.
- Ostrakhovitch, 2015. Tin. en Handbook on the Toxicology of Metals 4E. Volume 2. 1241-1276 pp.
- Oberdörster, E. y Cheek A. (2000). Gender benders at the beach: Endocrine disruption in marine and estuarine organisms. *Environ. Toxicol. Chem.* 20: 23–36.
- Palawski, D., Hunn, J. y Dwyer, F. (1985). Sensitivity of young striped bass to organic and inorganic contaminants in fresh and saline Waters. *Trans. Am. Fish. Soc.* 114:748-753.
- Plant, J. y Raiswell, R. (1983). Principles of Enviromental Geochemistry. En I. Thornton. Applied Enviromental Geochemistry. Academic Press Geology Series, Londres, 501 pp.
- Plant, J., Kinniburgh, D., Smedley, P., Fordyce, F., Klinck, B. (2004). Arsenic and Selenium. *Treatise on Geochemistry*, 9:17-66.
- Peshut P., Morrison R., Brooks B., (2007). Arsenic speciation in marine fish and shellfish from American Samoa. *Chemosphere* 71: 484-492.
- Pérez, E. (2011). Composición elemental (C, N, P, Fe, Mn, Zn, Cu, Cd, Ni) de las macroalgas de seis lagunas costeras del estado de Sinaloa, México: estequiometria y variabilidad de especies.
- Ragsdale, S. W., (2008). Nickel and Its Surprising Impact in Nature. Metal Ions in Life Sciences, Vol. 2. Edited by Astrid Sigel, Helmut Sigel, and Roland K. O. Sigel. *Angew. Chem. Int.*
- Ríos, S. (2008). Utilización de biomarcadores en peces y moluscos como indicadores de estrés ambiental en lagunas costeras. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. Pp 32-33
- Roberts, J., Reigart, J., Ebeling M. y Hulsey, T. (2001). Time required for blood lead levels to decline in nonchelated children. *Journal of Txicology- Clinical Toxicology*, 39: 153-60.
- Rodríguez, V., Carrizales, L., Mendoza, M., Fajardo, O. y Giordano M. (2002). Effects of sodiu arsenite exposure on development and behavior in the rat. *Neurotoxicol teratol* 24 (6): 743-750.
- Rosas R. (2001). Estudio de la contaminación por metales pesados en la cuenca del Llobregat. Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona.
- Schroeder, H., Balassa J. y Vinton, W. (1964). Chromium, lead, cadmium, nickel and titanium in nice: effect on mortality, tumours, and tissue levels. *J. Nutr.*, 83: 239-250.

- Sadiq, M., 1990. Arsenic chemistry in marine environments: a comparison between theoretical and field observations. *Mar. Chem.*, 31: 285-297.
- Shim, W., Oh, J., Kahng S., Shim, J., Lee, S. (1998). Accumulation of tributyl and triphenyltin compounds in Pacific oyster, *Crassostrea gigas*, from the Chinhae Bay System, Korea. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 35: 41-47.
- Stewart, C., de Mora, S. (1990). A review of the degradation of tri(nbutyl) tin in the marine environment. *Environ. Technol.* 11: 565-570.
- Sundararajan, M. y Natesan, U. (2010). Environmental geochemistry of core sediments from Serthalaikkadu Creek, East coast of India. *Environ Earth Science.* 62: 493-506.
- Sunda, W. (1987). Measurement of free cupric ion concentration in seawater by a ligand competition technique involving copper sorption onto C₁₈ SEP-PAK cartridges. *Limnology and Oceanography*, 32(3):537-551.
- Tapia-González F., Herrera-Silveira, J. y Aguirre-Macedo, M. (2008). Water quality variability and eutrophic trends in karstic tropical coastal lagoons of the Yucatán Peninsula. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 76: 418-430.
- Thompson, D.(1990). Metal levels in marine vertebrates. In Furness, R. W. and Rainbow, P. S. eds. Heavy metals in the marine environment. CRC Pres: Boca Ratón, pp 143-182.
- UNECE. (2011). Anexo 9: Guía de los peligros para el medio ambiente acuático. Naciones Unidas.
- Valenzuela, I., Gold-Bouchot, G. y Ceja, V. (2005). Hidrocarburos en agua y sedimentos de la laguna de Chelem, y puerto Progreso, Yucatán, México. p. 311-328. *In: A. V. Botello, J. Rendón-von Osten, G. Gold-Bouchot y C. Agraz-Hernández (Eds.). Golfo de México Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y Tendencias, 2da Edición. Univ. Autón. de Campeche, Univ. Nal. Autón. de México, Instituto Nacional de Ecología. 696 pp.*
- Villalobos-Pietrini, R. (1982). Efectos biológicos del cromo. Anales del Instituto de Biología de la Universidad Nacional Autónoma de México 48. Serie de Biología Experimental, 1: 115-162.
- Vega-Cendejas, M. (1998). Trama trófica de la comunidad nectónica asociada al ecosistema de manglar en el litoral de Yucatán. Tesis de Doctorado. Facultad de Ciencias. UNAM, México.
- Walkley, A. y Black, I., (1934). An examination of the Degtjareff method for determining organic carbon in soils: Effect of variations in digestion conditions and of inorganic soil constituents. *Soil Science*, 63:251-263.

Whitfield M., Turner D. y Dickison A. (1981). Speciation of dissolved constituents in estuaries. En: River inputs to ocean systems. Proceedings of UNESCO/IOC/UNEP Review Workshop, 16-19 March, 1979. Nueva York, United Nations, 132-188 pp.

Wong, P. y Trevors, J. (1988) Chromium toxicity to algae and bacteria. In: Chromium in the Natural and Human Environments (Nriagu, J. O. and Nieboer, E., Eds.). Wiley, New York. 305-315 pp.

Yawata, Y. Tanaka K. (1973). Red cell glutathione reductase: mechanism of action of inhibitors. *Biochim Biophys*, 321(1): 72-83.

Zar J. H. (2010). Bioestadistical analysis 5ª edición. Prentice Hall Pearson. USA. 944 pp.

Legislación consultada

Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos

Constitución Política del Estado de Yucatán

Ley Ambiental del Estado de Yucatán

Ley de Aguas Nacionales

Ley Federal del Mar

Ley General de Bienes Nacionales

Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente

Ley General para la prevención y Gestión Integral de los Residuos

Ley para la Gestión Integral de residuos en el Estado de Yucatán

Reglamento de la Ley de protección al Ambiente del Estado de Yucatán

Reglamento de la Ley de Puertos

Reglamento de limpia del Municipio de Progreso

ANEXOS

Anexo 1. Pruebas de normalidad y de homocedasticidad de los datos referente a los metales y As.

Para todos los metales y As se realizaron pruebas de normalidad y de homocedasticidad. Sólo el Pb de los sedimentos cumplieron estos supuestos sin transformación alguna. Para los demás metales se realizaron transformaciones con raíz cuadrada, raíz cuarta y logaritmo. Para el caso del Cd en sedimento con el ajuste de raíz cuadrada se cumplieron los supuestos de homocedasticidad y de normalidad por lo que se pudo realizar anova y posteriormente se realizaron los contrastes post-hoc. Con el As en sedimento se pudo cumplir con los supuestos de normalidad y homocedasticidad cuando se realizó una transformación a raíz cuarta y posteriormente se realizó anova y los contrastes post-hoc. Para el caso del Cu en sedimento con transformación a logaritmo se pudo realizar anova y los contrastes post-hoc.

Para el Sn, Cr y Ni en sedimentos no cumplieron los supuestos de normalidad y homocedasticidad aun realizando transformaciones a raíz cuadrada, raíz cuarta y logaritmo. Estos datos al ser no-paramétricos se decidió realizar Kruskal-Wallis y posteriormente se realizaron comparaciones múltiples.

En el caso de Pb, Cd, As, Cu, Sn, Cr y Ni en agua también se obtuvo que no cumplieron con los supuestos de normalidad y homocedasticidad. Al no cumplir con estos supuestos también se realizó la prueba de Kruskal-Wallis que posteriormente permitió realizar comparaciones múltiples.

Todos estos análisis se realizaron con el programa Statistica versión 10.

Anexo 2. Marco jurídico- administrativo

Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (CPEUM)

Artículo 27 párrafo quinto (DOF 29-01-2016).- ***Son propiedad de la Nación*** las aguas de los mares territoriales en la extensión y términos que fije el Derecho Internacional; las aguas marinas interiores; las de **las lagunas** y esteros que se comuniquen permanente o intermitentemente con el mar; las de los lagos interiores de formación natural que estén ligados directamente a corrientes constantes; las de los ríos y sus afluentes directos o indirectos, desde el punto del cauce en que se inicien las primeras aguas permanentes, intermitentes o torrenciales, hasta su desembocadura en el mar, lagos, lagunas o esteros de propiedad nacional; las de las corrientes constantes o intermitentes y sus afluentes directos o indirectos, cuando el cauce de aquéllas en toda su extensión o en parte de ellas, sirva de límite al territorio nacional o a dos entidades federativas, o cuando pase de una entidad federativa a otra o cruce la línea divisoria de la República; la de los lagos, lagunas o esteros cuyos vasos, zonas o riberas, estén cruzadas por líneas divisorias de dos o más entidades o entre la República y un país vecino, o cuando el límite de las riberas sirva de lindero entre dos entidades federativas o a la República con un país vecino; las de los manantiales que broten en las playas, zonas marítimas, cauces, vasos o riberas de los lagos, lagunas o esteros de propiedad nacional, y las que se extraigan de las minas; y los cauces, lechos o riberas de los lagos y corrientes interiores en la extensión que fija la ley.

Leves del Congreso

Ley General de Bienes Nacionales (LGBN)

Artículo 6.- *Están sujetos al régimen de dominio público de la Federación:*
IX.- *Los terrenos ganados natural o artificialmente al mar, ríos, corrientes, lagos, lagunas o esteros de propiedad nacional.*

Ley de Aguas Nacionales (LAN)

Artículo 9 (DOF 29-04-2004).- *"La Comisión" (CONAGUA) es un órgano administrativo desconcentrado de "la Secretaría", que se regula conforme a las disposiciones de esta Ley y sus reglamentos, de la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal y de su Reglamento Interior.*

I. *Fungir como la Autoridad en materia de la cantidad y de la calidad de las aguas y su gestión en el territorio nacional y ejercer en consecuencia aquellas atribuciones que conforme a la presente Ley corresponden a la autoridad en materia hídrica, dentro del ámbito de la competencia federal, con apego a la descentralización del sector agua, excepto las que debe ejercer directamente el Ejecutivo Federal o "la Secretaría" y las que*

estén bajo la responsabilidad de los Gobiernos de los estados, del Distrito Federal o municipios.

XIV. Fomentar y apoyar el desarrollo de los sistemas de agua potable y alcantarillado; los de saneamiento, tratamiento y reúso de aguas; los de riego o drenaje y los de control de avenidas y protección contra inundaciones en los casos previstos en la fracción IX del presente Artículo; contratar, concesionar o descentralizar la prestación de los servicios que sean de su competencia o que así convenga con los Gobiernos Estatales y, por conducto de éstos, con los Municipales, o con terceros;

Artículo 14 BIS 4 (DOF 29-04-2004).- Para los fines de esta Ley y sus reglamentos, son atribuciones de "la Procuraduría (PROFEPA)":

IV. Promover las acciones para la reparación o compensación del daño ambiental a los ecosistemas asociados con el agua en los términos de esta Ley y de las demás disposiciones jurídicas aplicables;

IX. La conservación, preservación, protección y restauración del agua en cantidad y calidad es asunto de seguridad nacional, por tanto, debe evitarse el aprovechamiento no sustentable y los efectos ecológicos adversos;

Artículo 86 (DOF 29-04-2004). "La Autoridad del Agua" tendrá a su cargo, en términos de Ley:

V. Establecer y vigilar el cumplimiento de las condiciones particulares de descarga que deben satisfacer las aguas residuales, de los distintos usos y usuarios, que se generen en:

a. Bienes y zonas de jurisdicción federal;

b. Aguas y bienes nacionales;

Artículo 88 BIS 1 (DOF 29-04-2004).- Las descargas de aguas residuales de uso doméstico que no formen parte de un sistema municipal de alcantarillado, se podrán llevar a cabo con sujeción a las Normas Oficiales Mexicanas que al efecto se expidan y mediante un aviso por escrito a "la Autoridad del Agua".

Párrafo quinto: Cuando se efectúen en forma fortuita una o varias descargas de aguas residuales sobre cuerpos receptores que sean bienes nacionales, los responsables deberán avisar inmediatamente a "la Autoridad del Agua", especificando volumen y características de las descargas, para que se promuevan o adopten las medidas conducentes por parte de los responsables o las que, con cargo a éstos, realizará "la Comisión" y demás autoridades competentes.

Párrafo sexto: Los responsables de las descargas mencionadas en el párrafo anterior, deberán realizar las labores de remoción y limpieza del contaminante de los cuerpos receptores afectados por la descarga. En caso de que el responsable no dé aviso, o habiéndolo formulado, "la Comisión" u otras autoridades competentes deban realizar tales labores, su costo será cubierto por dichos responsables dentro de los treinta días siguientes a su notificación y tendrán el carácter de crédito fiscal. Los daños que se ocasionen, serán determinados y cuantificados por "la Autoridad del Agua", y su monto al

igual que el costo de las labores a que se refieren, se notificarán a las personas físicas o morales responsables, para su pago.

Artículo 96 BIS 1 (DOF 29-04-2004).- Las personas físicas o morales que descarguen aguas residuales, en violación a las disposiciones legales aplicables, y que causen contaminación en un cuerpo receptor, asumirán la responsabilidad de reparar o compensar el daño ambiental causado en términos de la Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento, sin perjuicio de la aplicación de las sanciones administrativas, penales o civiles que procedan, mediante la remoción de los contaminantes del cuerpo receptor afectado y restituirlo al estado que guardaba antes de producirse el daño.

Artículo 113.- La administración de los siguientes bienes nacionales queda a cargo de "la Comisión":

I. Los terrenos ocupados por los vasos de lagos, lagunas, esteros o depósitos naturales cuyas aguas sean de propiedad nacional;

V. Los terrenos de los cauces y los de los vasos de lagos, lagunas o esteros de propiedad nacional, descubiertos por causas naturales o por obras artificiales;

VI. Las islas que existen o que se formen en los vasos de lagos, lagunas, esteros, presas y depósitos o en los cauces de corrientes de propiedad nacional, excepto las que se formen cuando una corriente segregue terrenos de propiedad particular, ejidal o comunal.

Ley Federal del Mar (LFM)

Artículo 2.- La presente Ley es de jurisdicción federal, rige en las zonas marinas que forman parte del territorio nacional y, en lo aplicable, más allá de éste en las zonas marinas donde la Nación ejerce derechos de soberanía, jurisdicciones y otros derechos. Sus disposiciones son de orden público, en el marco del sistema nacional de planeación democrática.

Artículo 3.- Las zonas marinas mexicanas son:

a) El Mar Territorial

b) Las Aguas Marinas Interiores

c) La Zona Contigua

d) La Zona Económica Exclusiva

e) La Plataforma Continental y las Plataformas Insulares y

f) Cualquier otra permitida por el derecho internacional.

Artículo 36.- Son aguas Marinas Interiores aquellas comprendidas entre la costa y las líneas de base, normales o rectas, a partir de las cuales se mide el Mar Territorial, de conformidad con las disposiciones pertinentes del Reglamento de la presente Ley y que incluyen:

I.- La parte norte del Golfo de California;

II.- Las de las bahías internas;

III.- Las de los puertos;

IV.- Las internas de los arrecifes; y

V.- Las de las desembocaduras o deltas de los ríos, lagunas y estuarios comunicados permanente o intermitentemente con el mar.

Artículo 36.- Son aguas Marinas Interiores aquellas comprendidas entre la costa y las líneas de base, normales o rectas, a partir de las cuales se mide el Mar Territorial, de conformidad con las disposiciones pertinentes del Reglamento de la presente Ley y que incluyen:

I.- La parte norte del Golfo de California;

II.- Las de las bahías internas;

III.- Las de los puertos;

IV.- Las internas de los arrecifes; y

V.- Las de las desembocaduras o deltas de los ríos, lagunas y estuarios comunicados permanente o intermitentemente con el mar.

Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA)

Artículo 36.- Para garantizar la sustentabilidad de las actividades económicas, la Secretaría emitirá normas oficiales mexicanas en materia ambiental y para el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales, que tengan por objeto:

I.- Establecer los requisitos, especificaciones, condiciones, procedimientos, metas, parámetros y límites permisibles que deberán observarse en regiones, zonas, cuencas o ecosistemas, en aprovechamiento de recursos naturales, en el desarrollo de actividades económicas, en la producción, uso y destino de bienes, en insumos y en procesos;

II. Considerar las condiciones necesarias para el bienestar de la población y la preservación de los recursos naturales y la protección del ambiente.

Artículo 96°: La Secretaría (SEMARNAT) expedirá las normas oficiales mexicanas para la protección de los ecosistemas acuáticos y promoverá la concertación de acciones de preservación y restauración de los ecosistemas acuáticos con los sectores productivos y las comunidades.

Artículo 121.- No podrán descargarse o infiltrarse en cualquier cuerpo o corriente de agua o en el suelo o subsuelo, aguas residuales que contengan contaminantes, sin previo tratamiento y el permiso o autorización de la autoridad federal, o de la autoridad local en los casos de descargas en aguas de jurisdicción local o a los sistemas de drenaje y alcantarillado de los centros de población.

Artículo 133.- La Secretaría, con la participación que en su caso corresponda a la Secretaría de Salud conforme a otros ordenamientos legales, realizará un sistemático y permanente monitoreo de la calidad de las aguas, para detectar la presencia de contaminantes o exceso de desechos orgánicos y aplicar las medidas que procedan. En los casos de aguas de jurisdicción local se coordinará con las autoridades de los Estados, el Distrito Federal y los Municipios.

Artículo 158.- Para los efectos del artículo anterior, la Secretaría:

V (DOF 13-12-1996).- *Impulsará el fortalecimiento de la conciencia ecológica, a través de la realización de acciones conjuntas con la comunidad para la preservación y mejoramiento del ambiente, el aprovechamiento racional de los recursos naturales y el correcto manejo de desechos. Para ello, la Secretaría podrá, en forma coordinada con los Estados y Municipios correspondientes, celebrar convenios de concertación con comunidades urbanas y rurales, así como con diversas organizaciones sociales, y*

VI (DOF 13-12-1996).- *Concertará acciones e inversiones con los sectores social y privado y con instituciones académicas, grupos y organizaciones sociales, pueblos indígenas y demás personas físicas y morales interesadas, para la preservación y restauración del equilibrio ecológico y la protección al ambiente.*

Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos (LGPGIR)

Artículo 5.- *Para los efectos de esta Ley se entiende por:*

XXIX. Residuo: Material o producto cuyo propietario o poseedor desecha y que se encuentra en estado sólido o semisólido, o es un líquido o gas contenido en recipientes o depósitos, y que puede ser susceptible de ser valorizado o requiere sujetarse a tratamiento o disposición final conforme a lo dispuesto en esta Ley y demás ordenamientos que de ella deriven;

XXX. Residuos de Manejo Especial: Son aquellos generados en los procesos productivos, que no reúnen las características para ser considerados como peligrosos o como residuos sólidos urbanos, o que son producidos por grandes generadores de residuos sólidos urbanos;

XXXI. Residuos Incompatibles: Aquellos que al entrar en contacto o al ser mezclados con agua u otros materiales o residuos, reaccionan produciendo calor, presión, fuego, partículas, gases o vapores dañinos;

XXXII. Residuos Peligrosos: Son aquellos que posean alguna de las características de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad, o que contengan agentes infecciosos que les confieran peligrosidad, así como envases, recipientes, embalajes y suelos que hayan sido contaminados cuando se transfieran a otro sitio, de conformidad con lo que se establece en esta Ley;

XXXIII. Residuos Sólidos Urbanos: Los generados en las casas habitación, que resultan de la eliminación de los materiales que utilizan en sus actividades domésticas, de los productos que consumen y de sus envases, embalajes o empaques; los residuos que provienen de cualquier otra actividad dentro de establecimientos o en la vía pública que genere residuos con características domiciliarias, y los resultantes de la limpieza de las vías y lugares públicos, siempre que no sean considerados por esta Ley como residuos de otra índole.

Artículo 10.- *Los municipios tienen a su cargo las funciones de manejo integral de residuos sólidos urbanos, que consisten en la recolección, traslado, tratamiento, y su disposición final, conforme a las siguientes facultades:*

- I. *Controlar los residuos sólidos urbanos;*
- II. *Prestar, por sí o a través de gestores, el servicio público de manejo integral de residuos sólidos urbanos, observando lo dispuesto por esta Ley y la legislación estatal en la materia.*

Artículo 19.- *Los residuos de manejo especial se clasifican como se indica a continuación, salvo cuando se trate de residuos considerados como peligrosos en esta Ley y en las normas oficiales mexicanas correspondientes:*

IV. Residuos de los servicios de transporte, así como los generados a consecuencia de las actividades que se realizan en puertos, aeropuertos, terminales ferroviarias y portuarias y en las aduanas;

IX. Pilas que contengan litio, níquel, mercurio, cadmio, manganeso, plomo, zinc, o cualquier otro elemento que permita la generación de energía en las mismas, en los niveles que no sean considerados como residuos peligrosos en la norma oficial mexicana correspondiente.

X. Los neumáticos usados.

Artículo 35.- *El Gobierno Federal, los gobiernos de las entidades federativas y los municipios, en la esfera de su competencia, promoverán la participación de todos los sectores de la sociedad en la prevención de la generación, la valorización y gestión integral de residuos, para lo cual:*

VI. Impulsarán la conciencia ecológica y la aplicación de la presente Ley, a través de la realización de acciones conjuntas con la comunidad para la prevención y gestión integral de los residuos, así como el uso de materiales que cumplan con criterios de eficiencia ambiental y tecnológica.

Artículo 68.- *Quienes resulten responsables de la contaminación de un sitio, así como de daños a la salud como consecuencia de ésta, estarán obligados a reparar el daño causado, conforme a las disposiciones legales correspondientes. Toda persona física o moral que, directa o indirectamente, contamine un sitio u ocasione un daño o afectación al ambiente como resultado de la generación, manejo o liberación, descarga, infiltración o incorporación de materiales o residuos peligrosos al ambiente, será responsable y estará obligada a su reparación y, en su caso, a la compensación correspondiente, de conformidad a lo previsto por la Ley Federal de Responsabilidad Ambiental*

Leyes Estatales, Yucatán

Ley Ambiental del Estado de Yucatán

Artículo 6.- *Son facultades y obligaciones del Poder Ejecutivo, a través de la Secretaría:*

II.- Preservar y restaurar el equilibrio ecológico y proteger el ambiente en el territorio del Estado de Yucatán;

XIX.- Prevenir y controlar la contaminación, así como los impactos generados por el aprovechamiento de los minerales o sustancias no reservadas a la Federación, que constituyan depósitos de naturaleza similar a los componentes de los terrenos, tales como rocas o productos de su descomposición y determinar la restauración de las áreas explotadas;

XXVI.- Promover la participación ciudadana en materia de protección al ambiente.

Artículo 7.- Son facultades y obligaciones de los municipios:

V.- Prevenir y controlar la contaminación de aguas nacionales, inclusive las que tengan asignadas o concesionadas para la prestación de servicios públicos y de las que descarguen en los sistemas de drenaje, alcantarillado, saneamiento de sus centros de población, sin perjuicio de las facultades reservadas a la Federación en materia de descarga, infiltración y reuso de aguas residuales.

Ley para la Gestión Integral de Residuos en el Estado de Yucatán

Artículo 8.- El Poder Ejecutivo tendrá las siguientes atribuciones:

XX.- Regular y establecer las bases para el cobro por la prestación de uno o varios de los servicios de Manejo integral de residuos de manejo especial, que induzcan la Minimización y permitan destinar los ingresos correspondientes al fortalecimiento de la infraestructura respectiva.

Artículo 27.- Son obligaciones de los Generadores de residuos sólidos y de manejo especial:

I.- Separar y almacenar los residuos de acuerdo a la normatividad aplicable;

II.- Adoptar la cultura de la reutilización, reducción y reciclaje de los residuos;

III.- Aplicar las disposiciones específicas, criterios, normas y recomendaciones técnicas para el manejo integral de los residuos sólidos y de manejo especial;

IV.- Denunciar ante las autoridades competentes las infracciones contra la normatividad en materia residuos;

V.- Observar los planes y programas de manejo que se establezcan, y

VI.- Las demás que establezcan las normas oficiales mexicanas y las normas técnicas ambientales aplicables.

Artículo 31.- Se prohíbe:

I. Desechar residuos de cualquier especie en sitios no autorizados;

III. Quemara cielo abierto todo tipo de residuos.

Artículo 80.- Los residuos eléctricos, electrónicos, pilas y batería deberán ser sometidos a un Manejo integral, de acuerdo a lo establecido en los planes de manejo y programas estatales o federales de manejo de residuos sólidos vigentes o, en su caso, en los términos de las disposiciones aplicables.

Artículo 88.- En caso de que no sea posible identificar al responsable de la contaminación de un sitio por residuos, las autoridades estatales y municipales coordinadamente llevarán a cabo las acciones necesarias para su remediación.

Reglamento de limpia del Municipio de Progreso

Artículo 4.- Con relación a los Residuos Sólidos, las acciones del servicio de limpia comprenden:

III.- Colocación y recolección de recipientes y contenedores de almacenamiento.

Artículo 24.- A todos los habitantes del Municipio corresponderá el deber de colaborar en el sistema de limpia pública, por lo tanto han de:

I. Clasificar los residuos en orgánicos, inorgánicos y otros grupos, en caso de que así lo indicara la autoridad competente.

II. Sacar los residuos sólidos en bolsas cerradas o recipientes, en el horario indicado, y depositarla en el sitio señalado por el H. Ayuntamiento.

III. En lugares donde se dificulte el acceso del camión de recolección (callejones o privadas), depositarla en los sitios previamente señalados y destinados para ello, por el H. Ayuntamiento.

IV.- Conservar limpios y bardeados sus predios.

V. En la vía pública, depositar la basura exclusivamente en los recipientes destinados para ello, y evitar su dispersión.

VI.- Barrer diariamente la acera o frente de sus viviendas o predios.

VII.- Retirar constantemente la maleza en el perímetro de sus predios.

VIII.- Denunciar el mal servicio o cualquier anomalía del servicio de limpia pública.

IX.- Cooperar con el H Ayuntamiento en:

I. Campañas de concientización.

2. *Acciones para la resolución del problema ocasionado por el mal manejo de los residuos sólidos.*

3. *Separación de los residuos sólidos para su aprovechamiento integral.*

X. *Informar al H. Ayuntamiento cuando en la vía pública, playa y en la ciénega se encuentren animales muertos u objetos tirados.*

XI. *No tirar residuos, escombros, ni sus similares, en las orillas de carreteras y caminos vecinales, o cualquier otro lugar considerado como vía pública.*

Artículo 32.- *Los propietarios o poseedores de terrenos que colinden con la playa, rías o Ciénega, deben evitar que se arroje o deposite residuos de cualquier naturaleza en esos lugares.*

Artículo 43.- *Los habitantes del Municipio están obligados a entregar sus residuos en los lugares designados, en los horarios previamente determinados. La violación a esta disposición se sancionará conforme a las disposiciones legales correspondientes.*

Artículo 100.- *El servicio de recolección de residuos causará derechos determinados anualmente por el cabildo y que se publicarán en la Ley de Ingresos del Municipio. Su monto se fijará diferencialmente según la zona en donde se ubique el predio, por el origen o por el tipo de residuos.*

Reglamento de la Ley de Puertos

Artículo 47. *Toda marina deberá contar al menos con los servicios e instalaciones que se mencionan a continuación:*

X. *Recolección y disposición de basura, desechos, aceite y aguas residuales, en los términos previstos en las leyes y reglamentos en materia ecológica.*

