



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE QUÍMICA

**Variación anual de As y metales en sedimentos de Ría
Lagartos, Yucatán.**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
QUÍMICO**

PRESENTA

LUIS TELLO DE MENESES VEGA



MÉXICO, D.F.

AÑO 2014



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.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: JOSE DE JESUS GARCIA VALDES

VOCAL: GEORGINA ARTEMISA DUARTE LISCI

SECRETARIO: FLOR ELISA DEL ROSARIO ARCEGA CABRERA

1er. SUPLENTE: NURIA ESTURAU ESCOFET

2do. SUPLENTE: SILVIA CITLALLI GAMA GONZALEZ

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: LABORATORIO DE BIOGEOQUÍMICA Y CALIDAD AMBIENTAL DE LA UNIDAD DE QUIMICA SISAL, FACULTAD DE QUÍMICA, UNAM

ASESOR DEL TEMA:



DRA. FLOR ELISA DEL ROSARIO ARCEGA CABRERA

SUSTENTANTE:

LUIS TELLO DE MENESES VEGA

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	6
ÍNDICE DE TABLAS	7
ÍNDICE DE FIGURAS.....	8
RESUMEN	10
1. INTRODUCCIÓN	12
1.1 CONTAMINACIÓN	14
1.2 MATRIZ DE ESTUDIO: SEDIMENTOS	15
1.3 METALES	17
1.4 METALES EN ESTUDIO	18
1.4.1 PLOMO (Pb)	18
1.4.2 CADMIO (Cd).....	19
1.4.3 ARSÉNICO (As)	20
1.4.4 HIERRO (Fe).....	21
1.4.5 MANGANESO (Mn)	21
1.4.6 ZINC (Zn)	22
1.4.7 COBRE (Cu)	23
1.4.8 NÍQUEL (Ni).....	24
1.4.9 CROMO (Cr)	24
1.4.10 ESTAÑO (Sn).....	25
1.4.11 ALUMINIO (Al).....	26
1.5 SQuiRTs	26
1.6 ÁREA DE ESTUDIO	27
1.7 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ÁREA DE ESTUDIO	28
1.7.1 FISIOGRAFÍA	28
1.7.2 EDAFOLOGÍA	28
1.7.3 HIDROLOGÍA	29
1.7.4 CLIMATOLOGÍA Y ESTACIONALIDAD	30
1.7.5 FAUNA.....	30
1.7.6 VEGETACIÓN.....	31
1.7.7 DEMOGRAFÍA.....	31
2. HIPÓTESIS	32
3. JUSTIFICACIÓN.....	33
4. OBJETIVOS.....	35
4.1 OBJETIVO GENERAL.....	35
4.2 OBJETIVOS PARTICULARES.....	35
5. ANTECEDENTES	39

6. METODOLOGÍA	41
6.1 RECOLECCIÓN Y ALMACENAMIENTO DE SEDIMENTOS	41
6.2 DIGESTIÓN ÁCIDA PARA METALES TOTALES EN SEDIMENTOS	42
6.3 CUANTIFICACIÓN DE METALES POR ABSORCIÓN ATÓMICA.....	43
6.3.1 HORNO DE GRAFITO	43
6.3.2 GENERACIÓN DE HIDRUROS	44
6.3.3 LLAMA DE AIRE/ACETILENO	44
6.4 GRANULOMETRÍA	45
6.5 CUANTIFICACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA EN SEDIMENTOS.....	45
6.6 LIMPIEZA DE MATERIAL	46
6.7 ANÁLISIS ESTADÍSTICO Y MULTIVARIADO	46
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	49
7.1 PARÁMETROS FISCOQUÍMICOS.....	49
7.1.1 PROFUNDIDAD	49
7.1.2 TEMPERATURA.....	50
7.1.3 CONDUCTIVIDAD	51
7.1.4 SALINIDAD	52
7.1.5 OXÍGENO DISUELTO	52
7.1.6 pH.....	53
7.1.7 PORCENTAJE DE MATERIAL FINO.....	54
7.1.8 VARIACIÓN ESPACIO-TEMPORAL DE % MO.....	55
7.2 VARIACION ESPACIO-TEMPORAL DE METALES	56
7.3 DETERMINACIÓN DE DAÑO POTENCIAL.....	56
7.3.1 CONCENTRACIÓN DE PLOMO	57
7.3.2 CONCENTRACIÓN DE CADMIO	58
7.3.3 CONCENTRACIÓN DE ARSÉNICO	59
7.3.4 CONCENTRACIÓN DE HIERRO	60
7.3.5 CONCENTRACIÓN DE MANGANESO.....	61
7.3.6 CONCENTRACIÓN DE ZINC	62
7.3.7 CONCENTRACIÓN DE COBRE	63
7.3.8 CONCENTRACIÓN DE NIQUEL	65
7.3.9 CONCENTRACIÓN DE CROMO.....	66
7.3.10 CONCENTRACIÓN DE ESTAÑO.....	67
7.3.11 CONCENTRACIÓN DE ALUMINIO.....	68
7.3.12 ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN EN LA CONCENTRACIÓN DURANTE 2010 Y 2011.....	69
7.3.13 DIAGRAMA DE CAJAS Y BIGOTES EN TEMPORADA DE LLUVIAS	70
7.3.14 DIAGRAMA DE CAJAS Y BIGOTES EN TEMPORADA DE NORTES	71
7.3.15 DIAGRAMA DE CAJAS Y BIGOTES EN TEMPORADA DE SECAS	72

7.3.16	ANÁLISIS DE AGRUPAMIENTO EN TEMPORADA DE LLUVIAS.....	73
7.3.17	ANÁLISIS DE AGRUPAMIENTO EN TEMPORADA DE NORTES	74
7.3.18	ANÁLISIS DE AGRUPAMIENTO EN TEMPORADA DE SECAS.....	75
7.3.19	ANÁLISIS DE AGRUPAMIENTO ESTACIONAL EN TEMPORADA DE LLUVIAS	76
7.3.20	ANÁLISIS DE AGRUPAMIENTO ESTACIONAL EN TEMPORADA DE NORTES	77
7.3.21	ANÁLISIS DE AGRUPAMIENTO ESTACIONAL EN TEMPORADA DE SECAS	78
7.3.22	ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES EN TEMPORADA DE LLUVIAS	79
7.3.23	ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES EN TEMPORADA DE NORTES	80
7.3.24	ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES EN TEMPORADA DE SECAS	81
7.3.25	ANÁLISIS DE FACTORES PARA TEMPORADA DE LLUVIAS	82
7.3.26	ANÁLISIS DE FACTORES PARA TEMPORADA DE NORTES.....	84
7.3.27	ANÁLISIS DE FACTORES PARA TEMPORADA DE SECAS	85
8.	CONCLUSIONES	87
9.	BIBLIOGRAFÍA	89
	ABREVIATURAS	96

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a CONACYT por la beca otorgada durante la elaboración de la presente tesis, dentro del proyecto de Ciencia Básica 101720.

A mi tutora la Doctora Flor Elisa del Rosario Arcega Cabrera, por permitirme trabajar en este proyecto y darme la asesoría necesaria que siempre solicité.

A mi comité, conformado por José de Jesús García Valdés, Georgina Artemisa Duarte Lisci, Nuria Esturau Escofet y Silvia Citlali Gama González, por el tiempo que dedicaron a la revisión de este trabajo.

A la doctora Elsa Noreña Barroso, técnica del laboratorio B de Biogeoquímica y Calidad Ambiental de la Facultad de Química Unidad Sisal, y a la maestra en ciencias Koryntia López Aguiar, técnico del laboratorio A de Biotecnología Alimentaria, Productos Farmacéuticos y Nutracéuticos de la Facultad de Química Unidad Sisal, por el apoyo que me brindaron en su centro de trabajo.

Al Ingeniero Químico Ismael Ocegüera Vargas por la asesoría y apoyo en el trabajo de laboratorio para la determinación de As y metales por técnicas espectroscópicas, que me brindo durante la realización del proyecto.

A mi madre, por apoyarme y siempre estar a mi lado, por darme el mejor de los ejemplos con su perseverancia y voluntad, por darme todo el amor que necesité, por todo su esfuerzo que ha realizado para que tuviera siempre lo mejor.

A mi familia, pero especialmente a mi hermano Carlos y a mi tía Leticia Vega, por cuidarme y ayudarme siempre en todo.

A mi abuelito Saúl que aunque ya no esté en estos momentos siempre fue un padre y siempre vio por mí.

A mis abuelitas Lupita y Manuela, que me han brindado todo lo necesario para llegar hasta donde estoy, siendo el soporte necesario para mi desarrollo.

A mi padre por brindarme los recursos necesarios y estar a mi lado apoyándome.

A mis amigos Lizbeth Rodríguez, Malinali Sánchez, Denise Monroy y José Manuel Flores con quienes he compartido mis años de licenciatura con alegrías, sonrisas y aventuras.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Localización de las estaciones de muestreo de la laguna de Ría Lagartos.

Tabla 2. Condiciones de temperatura para la digestión ácida de sedimentos.

Tabla 3. Relación entre tamaños de malla del tamiz utilizado y el tipo de suelo que representa.

Tabla 4. Promedio de Material Fino

Tabla 5. Valores de referencia de la NOAA SQuiRTs

Tabla 6. Comparación de las concentraciones obtenidas en el año 2010 y 2011

Tabla 7. Análisis de factores para metales (Pd, Cd, As, Mn, Zn, Cu, Ni, Cr, Sn, Fe y Al) ($\mu\text{g g}^{-1}$) y parámetros geoquímicos (%MO, %CaCO₃ y %Finos) de sedimento en temporada de Lluvias.

Tabla 8. Análisis de factores para metales (Pd, Cd, As, Mn, Zn, Cu, Ni, Cr, Sn, Fe y Al) ($\mu\text{g g}^{-1}$) y parámetros geoquímicos (%MO, %CaCO₃ y %Finos) de sedimento en temporada de Nortes.

Tabla 9. Análisis de factores para metales (Pd, Cd, As, Mn, Zn, Cu, Ni, Cr, Sn y Fe) ($\mu\text{g g}^{-1}$) y parámetros geoquímicos (%MO, %CaCO₃ y %Finos) de sedimento en temporada de Secas.

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1. Puntos de muestreo de Ría Lagartos, Yucatán
- Figura 2. Zonificación de Ría Lagartos, Yucatán
- Figura 3. Fuentes de Contaminación de Ría Lagartos, Yucatán
- Figura 4. Diagrama de flujo de la digestión ácida para metales en sedimentos
- Figura 5. Cuantificación de metales por AA con Perkin Elmer Analyst 800
- Figura 6. Variación espacio-temporal de la profundidad
- Figura 7. Variación espacio-temporal de la temperatura
- Figura 8. Variación espacio-temporal de la conductividad
- Figura 9. Variación espacio-temporal de la salinidad
- Figura 10. Variación espacio-temporal de oxígeno disuelto
- Figura 11. Variación espacio-temporal de pH
- Figura 12. Variación espacio-temporal del porcentaje de material fino
- Figura 13. Variación espacio-temporal del porcentaje de materia orgánica
- Figura 14. Concentración de Pb obtenido en sedimentos superficiales en las tres épocas de un ciclo anual
- Figura 15. Concentración de Cd obtenido en sedimentos superficiales en las tres épocas de un ciclo anual y el límite establecido como criterio ecológico TEL (Nivel de Efecto mínimo).
- Figura 16. Concentración de As obtenido en sedimentos superficiales en las tres épocas de un ciclo anual y el límite establecido como criterio ecológico TEL (Nivel de Efecto mínimo) y ERM (Mediana del Rango de efecto).
- Figura 17. Concentración de Fe obtenido en sedimentos superficiales en las tres épocas de un ciclo anual
- Figura 18. Concentración de Mn obtenido en sedimentos superficiales en las tres épocas de un ciclo anual
- Figura 19. Concentración de Zn obtenido en sedimentos superficiales en las tres épocas de un ciclo anual
- Figura 20. Concentración de Cu obtenido en sedimentos superficiales en las tres épocas de un ciclo anual y el límite establecido como criterio ecológico TEL (Nivel de Efecto mínimo) y ERL (Intervalo de efecto bajo).
- Figura 21. Concentración de Ni obtenido en sedimentos superficiales en las tres épocas de un ciclo anual y el límite establecido como criterio ecológico TEL (Nivel de Efecto mínimo), ERL (Intervalo de efecto bajo) y PEL (Niveles de efecto probable).
- Figura 22. Concentración de Cr obtenido en sedimentos superficiales en las tres épocas de un ciclo anual y el límite establecido como criterio ecológico TEL (Nivel de Efecto mínimo).
- Figura 23. Concentración de Sn obtenido en sedimentos superficiales en las tres épocas de un ciclo anual.
- Figura 24. Concentración de Al obtenido en sedimentos superficiales en las tres épocas de un ciclo anual y el límite establecido como criterio ecológico AET (Efecto mínimo evidente).
- Figura 25. Diagrama de cajas para las concentraciones de Pb ($\mu\text{g g}^{-1}$), Cd ($\mu\text{g g}^{-1}$), As ($\mu\text{g g}^{-1}$), Fe (mg g^{-1}), Mn ($\mu\text{g g}^{-1}$), Zn ($\mu\text{g g}^{-1}$), Cu ($\mu\text{g g}^{-1}$), Ni ($\mu\text{g g}^{-1}$), Cr ($\mu\text{g g}^{-1}$), Sn ($\mu\text{g g}^{-1}$) y Al (mg g^{-1}), además de parámetros geoquímicos como %MO (materia

orgánica), %Finos (material fino) y %CaCO₃ (carbonatos) en sedimentos en temporada de Lluvias de la zona costera de Ría Lagartos.

Figura 26. Diagrama de cajas para las concentraciones de Pb ($\mu\text{g g}^{-1}$), Cd ($\mu\text{g g}^{-1}$), As ($\mu\text{g g}^{-1}$), Fe (mg g^{-1}), Mn ($\mu\text{g g}^{-1}$), Zn ($\mu\text{g g}^{-1}$), Cu ($\mu\text{g g}^{-1}$), Ni ($\mu\text{g g}^{-1}$), Cr ($\mu\text{g g}^{-1}$), Sn ($\mu\text{g g}^{-1}$) y Al (mg g^{-1}), además de parámetros geoquímicos como %MO (materia orgánica), %Finos (material fino) y %CaCO₃ (carbonatos) en sedimentos en temporada de Nortes de la zona costera de Ría Lagartos.

Figura 27. Diagrama de cajas para las concentraciones de Pb ($\mu\text{g g}^{-1}$), Cd ($\mu\text{g g}^{-1}$), As ($\mu\text{g g}^{-1}$), Fe (mg g^{-1}), Mn ($\mu\text{g g}^{-1}$), Zn ($\mu\text{g g}^{-1}$), Cu ($\mu\text{g g}^{-1}$), Ni ($\mu\text{g g}^{-1}$), Cr ($\mu\text{g g}^{-1}$), Sn ($\mu\text{g g}^{-1}$) y Al (mg g^{-1}), además de parámetros geoquímicos como %MO (materia orgánica), %Finos (material fino) y %CaCO₃ (carbonatos) en sedimentos en temporada de Secas de la zona costera de Ría Lagartos.

Figura 28. Diagrama resultante del análisis de agrupamiento de metales (Pd, Cd, As, Mn, Zn, Cu, Ni, Cr, Sn, Fe y Al) ($\mu\text{g g}^{-1}$) y parámetros geoquímicos (%MO, %CaCO₃ y %Finos) de sedimento en temporada de Lluvias.

Figura 29. Diagrama resultante del análisis de agrupamiento de metales (Pd, Cd, As, Mn, Zn, Cu, Ni, Cr, Sn, Fe y Al) ($\mu\text{g g}^{-1}$) y parámetros geoquímicos (%MO, %CaCO₃ y %Finos) de sedimento en temporada de Nortes.

Figura 30. Diagrama resultante del análisis de agrupamiento de metales (Pd, Cd, As, Mn, Zn, Cu, Ni, Cr, Sn, Fe y Al) ($\mu\text{g g}^{-1}$) y parámetros geoquímicos (%MO, %CaCO₃ y %Finos) de sedimento en temporada de Secas.

Figura 31. Diagrama resultante del análisis de agrupamiento de metales (Pd, Cd, As, Mn, Zn, Cu, Ni, Cr, Sn, Fe y Al) ($\mu\text{g g}^{-1}$) y parámetros geoquímicos (%MO, %CaCO₃ y %Finos) en sedimento por estaciones en temporada de Lluvias.

Figura 32. Diagrama resultante del análisis de agrupamiento de metales (Pd, Cd, As, Mn, Zn, Cu, Ni, Cr, Sn, Fe y Al) ($\mu\text{g g}^{-1}$) y parámetros geoquímicos (%MO, %CaCO₃ y %Finos) en sedimento por estaciones en temporada de Nortes.

Figura 33. Diagrama resultante del análisis de agrupamiento de metales (Pd, Cd, As, Mn, Zn, Cu, Ni, Cr, Sn, Fe y Al) ($\mu\text{g g}^{-1}$) y parámetros geoquímicos (%MO, %CaCO₃ y %Finos) en sedimento por estaciones en temporada de Secas.

Figura 34. Análisis de componentes principales de metales (Pd, Cd, As, Mn, Zn, Cu, Ni, Cr, Sn, Fe y Al) ($\mu\text{g g}^{-1}$) y parámetros geoquímicos (%MO, %CaCO₃ y %Finos) en sedimento en temporada de Lluvias.

Figura 35. Análisis de componentes principales de metales (Pd, Cd, As, Mn, Zn, Cu, Ni, Cr, Sn, Fe y Al) ($\mu\text{g g}^{-1}$) y parámetros geoquímicos (%MO, %CaCO₃ y %Finos) en sedimento en temporada de Nortes.

Figura 36. Análisis de componentes principales de metales (Pd, Cd, As, Mn, Zn, Cu, Ni, Cr, Sn, Fe y Al) ($\mu\text{g g}^{-1}$) y parámetros geoquímicos (%MO, %CaCO₃ y %Finos) en sedimento en temporada de Secas.

RESUMEN

Las actividades humanas impactan de manera negativa a las zonas costeras. Las lagunas costeras por su geoquímica e hidrología son especialmente sensibles ya que funcionan como trampas para los contaminantes. Entre los tóxicos para la biota acuática se encuentran los metales pesados, cuyos niveles y variaciones son necesarios de conocer para determinar su impacto ambiental. Los sedimentos registran sucesos ambientales mediante el proceso de acumulación y estratificación, reflejando la variación de los elementos en los sistemas. Con base en lo anterior se propuso determinar la concentración de metales (Pb, Cd, As, Fe, Mn, Cu, Ni, Cr, Sn y Zn) en sedimentos de la laguna de Ría Lagartos, Yucatán, como indicador del estado de contaminación del sistema.

El estudio se realizó en tres temporadas del año: de Lluvias en Agosto; de Nortes en Noviembre y de Secas en Mayo. Se muestrearon 11 sitios distribuidos a lo largo de la Laguna de Ría Lagartos. Se registraron los parámetros fisicoquímicos: pH, salinidad, conductividad, determinación de oxígeno disuelto, temperatura y el potencial de óxido-reducción (Eh). El análisis de metales se realizó a través de la técnica de espectrometría de absorción atómica con horno de grafito, llama de aire/acetileno y generador de hidruros.

Los resultados indican que el As, Cd, Cu, Ni y Sn se encuentran por encima de los valores permisibles reportados en las tablas de la National Oceanic and Atmospheric Administration- Screening Quick Reference Table for Inorganics in Solids (NOAA SQuiRTs, Buchmann, 2008). A diferencia del estudio realizado en 2010, donde el Sn y el As eran los únicos metales por encima del límite permisible, ahora se percibe la presencia de otros metales y en mayor concentración. La contaminación en Ría Lagartos ha aumentado principalmente en zonas donde hay asentamientos o actividades humanas.

Adicionalmente hay una variación espacio-temporal significativa relacionada primordialmente con las características geoquímicas de los sedimentos durante Lluvias, Nortes y Secas.

El nivel obtenido con respecto a las SQuiRTs indica que ya existen daños a los organismos bentónicos y, si la tendencia se mantiene, los daños afectarían incluso la salud humana. Es primordial proteger la Laguna de Ría Lagartos, implementando legislación que establezcan límites permisibles de estos contaminantes en sedimentos, para evitar que sigan aumentando.

1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento demográfico y el desarrollo industrial generan grandes cantidades de aguas residuales que se vierten en mares, lagos, ríos, etc. En muchas ocasiones sin ningún tratamiento. Éstas son de composición variada y provienen de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos y en general de cualquier otro uso (SEMARNAT, 1997). Todas estas fuentes de contaminantes contienen microorganismos patógenos, hidrocarburos, metales, contaminantes emergentes, entre otros.

El problema de los metales pesados es su persistencia en el ambiente. La masa total del metal es conservativa y los iones metálicos se encuentran como diversas especies químicas (por ejemplo, como hidróxidos, carbonatos, sulfatos, etc.), esto implica un serio problema de contaminación ya que a partir de ciertos niveles de concentración constituyen un riesgo para la flora, la fauna y el hombre (Bohn, 1993; Cheng y Allen, 2006; Kelderman y Osman, 2007).

Las concentraciones naturales de los metales en ecosistemas acuáticos dependen del aporte por fuentes puntuales y no puntuales, su distribución, meteorización y lixiviación en el área de la cuenca. Las actividades humanas, industriales, urbanas o agrícolas podrían incrementar la carga de metales pesados en los ecosistemas acuáticos o alterar sus ciclos naturales al producir concentraciones elevadas (Tulonen *et al.* 2006). La mayoría de los metales llegan a los sistemas acuáticos a través de descargas directas, precipitación húmeda o seca y erosión (Altindag y Yigit *et al.* 2005).

La contaminación en México deriva de las diversas actividades humanas que se realizan dentro del marco económico sin considerar el marco ecológico. Esto ha traído consigo un deterioro ambiental crítico, especialmente en los sistemas costeros. Tal es el caso de la Reserva de la Biosfera Ría Lagartos (CONANP, 2007). Estas lagunas costeras son altamente productivas (Chapman, 2012) y muy explotadas para diversas actividades como el turismo, la intensa presión demográfica y el desarrollo urbano desordenado. Además Reciben presiones naturales, como los huracanes y

nortes (CONANP, 2007), lo que ocasiona el aumento potencial de su fragilidad ecológica e incrementa su sensibilidad a los contaminantes (Villanueva y Vázquez, 1992).

Las lagunas costeras son depresiones que tienen una conexión permanente o efímera con el mar y están protegidas por algún tipo de barrera. Su conformación estructural resulta de la interrelación de varios ecosistemas como el manglar, el río, el mar, los manantiales y la vegetación acuática. Reciben y acumulan en abundancia materia orgánica y nutrientes que provienen del mar, los ríos y aguas subterráneas (Herrera-Silveira y Comín, et al., 2000). Las lagunas costeras son sistemas con características fisicoquímicas únicas debido a los fuertes gradientes de salinidad, temperatura, pH, oxígeno disuelto, potencial redox, características químicas de los sedimentos y composición de especies.

Las ventajas naturales de las lagunas costeras y los múltiples servicios ambientales que ofrecen han provocado que aproximadamente el 75 % presenten algún síntoma de impacto. Existen problemas ambientales, sociales y hasta económicos derivados del deterioro ocasionado por la contaminación puntual o difusa y las alteraciones de los flujos de intercambio de agua dulce y marina por la apertura permanente con el mar (Tapia-González, et al., 2008; Herrera-Silveira, et al., 2006)

En las lagunas costeras se favorece el proceso de sedimentación por disminución del flujo hídrico (corriente de agua constante y permanente) (Olmestad y Durán, 1993). Los sedimentos constituyen un material fundamental para conocer el grado de contaminación por metales de una determinada zona (Forstner et al., 1989). El contenido de metales en sedimentos depende principalmente de las características geológicas de la cuenca y también depende de los aportes naturales y antropogénicos (Urrutia et al., 2002; Arcega-Cabrera et al., 2009, 2014).

Los sedimentos superficiales, dependiendo de las características geoquímicas e hidrológicas, son sistemas con variaciones importantes al estar reciclando

constantemente elementos y compuestos por agentes biológicos y químicos (Florence y Batley, 1979).

El reciclado o biodisponibilidad de metales en los sedimentos es la capacidad para cambiar de la matriz sedimentaria a la acuosa. Dicha biodisponibilidad ocasiona que los metales sean potencialmente tóxicos, ya que ingresan a la red trófica. Aquí los procesos de bioacumulación, bioconcentración y biomagnificación repercuten directamente sobre algunas especies acuáticas que acumulan altas concentraciones de metales, ocasionando efectos crónicos en sus poblaciones (Ponce y Vázquez, 1992; Acosta *et al.*, 2002).

1.1 CONTAMINACIÓN

La contaminación ambiental se caracteriza por la presencia de sustancias o elementos que causan un daño a la salud y al bienestar del hombre, o afectan los ecosistemas. Esto sucede cuando se exceden ciertos límites, considerados tolerables, que evolucionan lentamente en el tiempo y su efecto nocivo se manifiesta como un deterioro progresivo de las condiciones ambientales (Segob y Cenapred, 2001). La contaminación se presenta en aire, agua o suelo, y en cada caso presenta características particulares que requieren medidas de prevención y control específicos.

La contaminación se puede originar de manera natural como los incendios forestales; o de manera antropogénica, donde el hombre dispersa sustancias peligrosas, ya sean biodegradables o no. Se ha encontrado que el aporte principal de metales proviene del área continental (Vázquez y Páez, 1987).

Dependiendo de la naturaleza del mar, el carácter de los contaminantes y la forma en que son desechados, la concentración en el agua disminuye la capacidad de dispersión. El medio costero se contamina antes de que el agua oceánica logre diluirlos, esto según las características fisicoquímicas, geoquímicas y dinámicas (Ponce y Vázquez, 1992). Los compuestos permanecen en la columna de agua y se integran a los sedimentos o a la red trófica.

La industrialización y el desarrollo humano han ocasionado que el flujo de los metales superen los flujos naturales derivados de procesos geológicos. Para poder estimar los niveles de contaminación es importante conocer la concentración de metales en el ambiente (Vázquez *et al.*, 1976).

1.2 MATRIZ DE ESTUDIO: SEDIMENTOS

El sedimento ayuda a comprender cómo las concentraciones de los contaminantes se relacionan con las características generales y típicas de cada zona, principalmente en las áreas costeras, debido a que en ellas se tiene una interacción más dinámica con los procesos físicos, químicos y biológicos (Concalves *et al.*, 1990; Dassenakis *et al.*, 1997).

La diagénesis y acumulación de los metales en los sedimentos dependen de factores como la condición redox del fondo y de la actividad microbiana. Éstos determinan las formas de asociación de los metales con la matriz del sedimento (Henrichs *et al.*, 1992; Tam *et al.*, 1995). Los sedimentos superficiales son importantes en el transporte de metales traza, porque reflejan la calidad actual (Salomons y Förstner, 1984) o el estado de salud de los sistemas acuáticos.

Los sedimentos son un factor muy importante en el control de la ecología de las lagunas costeras. Generalmente presentan concentraciones considerables de elementos traza, nutrientes y materia orgánica (MO) (Kennish, 1986). En los sedimentos, los ciclos de algunos elementos químicos son principalmente: carbono, nitrógeno, fósforo y azufre. Estos elementos son afectados por las reacciones geoquímicas en la interfase agua-sedimento, como el intercambio y la difusión de iones disueltos o adsorbidos por diversos compuestos y gases (Kennish, 1986).

Determinar la textura de los sedimentos y su contenido de MO es primordial en los estudios de los sistemas acuáticos. Se ha demostrado que la adsorción de contaminantes orgánicos hidrofóbicos y metales se correlacionan con éstos (Al-Ghadban *et al.* 1994). Por otra parte, los organismos contribuyen al transporte de

sedimentos y al reciclaje de nutrientes a través de la bioturbación (alteración de un sedimento por la acción de los seres vivos) y resuspensión.

Se ha demostrado que las condiciones redox en lagos y embalses de zonas tropicales varían de acuerdo con el período del año (Beadle 1966, Hansen y Márquez-Pacheco 2012). Se distinguen dos estaciones: la primera caracterizada por la estratificación térmica (acompañada por anoxia en el fondo del cuerpo de agua) y la segunda por la mezcla del agua.

En época de calor, el sol calienta la superficie del agua y, debido a su baja conductividad térmica, la temperatura en la superficie se difunde muy lentamente a las capas inferiores, generando así la estratificación térmica (Hutchinson 1957). Esto forma una capa de agua más caliente sobreyacente a la termoclina (capa delgada entre la parte superficial más cálida y la más fría del fondo) que tiene contacto con la atmósfera, el epilimnion (parte superior de un cuerpo de agua), y una capa de agua más fría, subyacente a la termoclina y que no tiene contacto con la atmósfera, el hipolimnion (capa inferior).

La demanda de oxígeno en agua del hipolimnion y en el sedimento provocan la reducción del potencial redox (Eh), dando lugar a la disolución reducida de óxidos de hierro y de manganeso, provocando la solubilización de los metales adsorbidos en ellos (Harrington *et al.* 1998).

El enfriamiento del agua del epilimnion causa nuevamente la mezcla y oxigenación de los cuerpos de agua. El Eh varía entre muy oxidado y muy reducido (Patrick y DeLaune 1977), afectando así la distribución de metales entre el agua y el sedimento (Guo *et al.* 1997, Mansfeldt 2004). De esta manera, las condiciones oxidadas en la interfase agua-sedimento favorecen la insolubilidad de los metales traza, mientras que las condiciones reducidas favorecen su solubilidad.

1.3 METALES

La expresión “metales pesados” se usa para aludir, de un modo no muy preciso, a ciertos elementos y a algunos de sus compuestos, a los que se atribuyen determinados efectos de contaminación, toxicidad y ecotoxicidad. Es importante destacar que no hay (diciembre 2013) una definición oficial generalmente aceptada, ni un listado, ni una referencia clara y exacta de las propiedades o caracteres de los Metales Pesados que provenga de alguna sociedad científica u organismo referente de alto nivel: como la IUPAC (Unión Internacional de Química Pura y Aplicada) o la USEPA, (Agencia de Protección Ambiental de los EUA). Por ello, en el presente trabajo nos referiremos a los diferentes grupos de metales y metaloides como metales.

Sin embargo, se consideran metales pesados a aquellos con densidad igual o superior a 6 g cm^{-3} cuando están en forma elemental. Su presencia en la corteza terrestre es inferior al 0.1% y casi siempre menor al 0.01%. Hay otros elementos como arsénico (As), boro (B), bario (Ba) y selenio (Se) que suelen englobarse con ellos por presentar orígenes y comportamientos asociados. Una gran cantidad de metales, incluyendo los pesados, se consideran elementos traza, bajo esta denominación se agrupan detectables en un intervalo de concentración de 100 a 0.01 ppm y se reserva el término ultratrazas a niveles comprendidos entre 0.01 ppm y 10 ppb (Galán y Romero, 2008; Manahan, 2007)

En los metales pesados se distinguen dos grupos:

Los micronutrientes: necesarios para la vida de determinados organismos, son requeridos en pequeñas cantidades o cantidades traza y pasado cierto umbral de concentración se vuelven tóxicos. En este grupo se encuentran As, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Se, V, Zn (Galán y Romero, 2008).

No esenciales: cuya presencia en determinadas cantidades provocan disfunciones en los organismos. Resultan altamente tóxicos y se acumulan en organismos vivos. Son principalmente: Be, Cd, Hg, Ni, Pb, Sb, Sn y Ti (Galán y Romero, 2008).

Los metales pesados han sido objeto de atención por sus características contaminantes (Manahan, 2007). Presentan carácter acumulativo; son necesarios y beneficiosos para las plantas y otros organismos, en determinados niveles, pero también son tóxicos a cierto nivel de concentración. Están presentes en los suelos a concentración denominada nivel de fondo, cuyo origen no es externo, sino que proviene del material parental originario de las rocas y su transformación. Con frecuencia se encuentran como cationes que interactúan fuertemente con la matriz del suelo, incluso a altas concentraciones se hallan en forma química inerte. Sin embargo, estos metales se movilizan y cambian de forma química por alteraciones de las condiciones medio ambientales, por esta razón se les cataloga como bomba química de tiempo (Morales, 2001).

A continuación se muestran los usos, fuentes y toxicidad de los metales en estudio.

1.4 METALES EN ESTUDIO

1.4.1 PLOMO (Pb)

Los minerales de plomo se encuentran en muchos lugares del mundo. El más abundante es la galena (PbS) y constituye la fuente principal de producción comercial de este metal. Otros minerales son: la cerusita (PbCO_3), la anglesita (PbSO_4), la wulfenita (PbMoO_4), la piromorfita ($\text{Pb}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$) y la vanadinita ($\text{Pb}_5(\text{VO}_4)_3\text{Cl}$). En muchos casos, los minerales de plomo contienen otros metales tóxicos.

El plomo metálico se utiliza en forma de planchas o tubos cuando se requiere una gran maleabilidad y resistencia a la corrosión, como en la industria química o en la construcción. También se utiliza como revestimiento de cables, componente de soldadura y empaste en la industria automovilística. Es un excelente protector de radiaciones ionizantes y recubrimientos metalizado, se usa en la fabricación de acumuladores y como baño de termo tratamiento en el revenido de hilos metálicos.

El plomo forma una gran variedad de aleaciones y sus compuestos se utilizan en grandes cantidades en numerosas industrias. Aproximadamente un 40 % se utiliza en forma metálica, un 25 % en aleaciones y un 35 % en compuestos químicos. Los óxidos de plomo se utilizan en placas de baterías eléctricas y los acumuladores (PbO y Pb_3O_4), como agentes de mezcla en la fabricación de caucho (PbO), en la fabricación de pinturas (Pb_3O_4) y como componentes de barnices, esmaltes y vidrios. El arseniato es un insecticida; el sulfato se utiliza en mezclas de caucho; el acetato tiene usos importantes en la industria química; el naftenato es un agente desecante muy utilizado y el tetraetilo se utiliza como agente antidetonante para la gasolina en aquellos países en que la legislación aún lo permite.

Este metal, aunque existe en los tejidos y órganos de los mamíferos, ocasiona daños irreversibles a los huesos y al sistema nervioso central después de una exposición a altas concentraciones ya que tiene una similitud química con el calcio y compiten por los sitios de fijación en las células, alterando múltiples funciones de las mismas como las actividades que realizan las neuronas. (Banks, et al., 1997, Lenntech, 2011).

1.4.2 CADMIO (Cd)

Las propiedades químicas y físicas del cadmio (Cd) son muy similares a las del zinc, y con frecuencia coexisten en la naturaleza. En los minerales y las menas, la proporción de cadmio y zinc suele oscilar entre 1:100 a 1:1,000. El cadmio es muy resistente a la corrosión y se utiliza en electrodeposición sobre acero y hierro principalmente. Los tornillos, las tuercas de seguridad, los pestillos y diversas partes de los aviones y vehículos de motor están recubiertos con cadmio para protegerlos de la corrosión (Lenntech, 2011). Los compuestos de cadmio se utilizan también como pigmentos y estabilizadores de plásticos (30 % de su uso en países desarrollados) y en ciertas aleaciones (3 %).

Las principales fuentes de Cd en ambientes acuáticos se deben al lavado de los suelos agrícolas y a las descargas de la minería y la industria. Otra fuente importante son los desechos municipales y los lodos de las plantas de tratamiento (Villanueva y

Vázquez, 1992). La zona de la Península de Yucatán no presenta fuentes naturales de Cd, por lo que su presencia es causada por las actividades humanas (Valdespino, 2005). En medios biológicos la solubilidad del Cd depende de factores como el pH y la temperatura. En aguas costeras una alta proporción de este metal se encuentra asociado a la formación de complejos con la MO que disminuyen la capacidad de sobrevivencia de larvas y estadios juveniles de peces, moluscos y crustáceos (Valdespino, 2005).

El cadmio es dañino para todas las células del organismo. Los hallazgos patológicos en los casos mortales por ingestión de cadmio, son: inflamación gastrointestinal intensa, así como lesión hepática y renal o la presencia de efisema. El cadmio provoca problemas desconocidos en el organismo, por lo que es importante estar consciente de los altos niveles que se detecten en el medio ambiente y que podrían representar un peligro importante para la salud, (Robertson, 1988).

1.4.3 ARSÉNICO (As)

El arsénico se encuentra ampliamente distribuido en la naturaleza y principalmente en minerales sulfurosos. La arsenopirita (FeAsS) es la forma más abundante. El arsénico en aleaciones aumenta su dureza y resistencia al calor, con plomo, se fabrican municiones y baterías de polarización. También se utiliza para la fabricación de vidrio, como componente de dispositivos eléctricos y como agente de adulteración en los productos de germanio y silicio en estado sólido.

En el agua As (V) es la especie más común (Armienta, et al., 2007) la cual se forma preferentemente a altas concentraciones de oxígeno disuelto, pH alcalino, alto potencial Redox y bajo contenido de materia orgánica. Por otro lado, la formación de las especies de As (III) son favorecidas bajo condiciones opuestas, siendo ésta la especie más tóxica (Bradl, 2005).

El consumo de productos contaminados con arsénico ocasionan daños a la salud como afectaciones al sistema circulatorio, e intensifica las posibilidades de desarrollar cáncer de piel, hígado y pulmón principalmente. (Fergusson, 1990).

1.4.4 HIERRO (Fe)

El hierro es el segundo metal más abundante y el cuarto de todos los elementos, superado únicamente por el oxígeno, el silicio y el aluminio. Los minerales más comunes son: la hematita o mineral de hierro rojo (Fe_2O_3), que contiene un 70 %; la limonita o mineral de hierro marrón ($\text{FeO}(\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$), con un 42 %; la magnetita o mineral de hierro magnético (Fe_3O_4), con un alto contenido de hierro; la siderita o mineral de hierro espático (FeCO_3); la pirita (FeS_2), el mineral azufrado más común; y la pirrotita o pirita magnética (FeS).

El hierro se utiliza para la fabricación de piezas de acero fundido y en aleaciones con otros metales. También es un metal importante en la fabricación de imanes, tintes, abrasivos y es útil para aumentar la densidad de los líquidos en la perforación petrolífera.

Debido a que forma parte de la hemoglobina de la sangre de los peces, debe ser incluido como uno de los ingredientes de su dieta pero la concentración demasiado alta causa incluso su muerte. El hierro se presenta en diferentes estados, Fe (II) (hierro ferroso) y Fe (III) (hierro férrico). En peces, la reacción de oxidación del Fe (II) a Fe (III) genera obstrucción branquial por acumulación de hidróxido de hierro, causando la muerte. El tiempo en presentarse esta adherencia de hierro, depende del pH del agua, su salinidad y su temperatura. (Rainbow, 2002)

1.4.5 MANGANESO (Mn)

El manganeso (Mn) es uno de los elementos más abundantes de la corteza terrestre. Se encuentra en sedimentos, rocas, agua y productos biológicos. Se hallan preferentemente en minerales en forma de óxidos, carbonatos y silicatos. Dicho elemento posee ocho estados de oxidación, siendo los más importantes: +2, +3 y +7.

Se utiliza en la producción de acero para reducir el oxígeno y el azufre, y como agente de aleación para la fabricación de aceros especiales (con el aluminio y el cobre), en la producción de permanganato de potasio y otros productos químicos derivados del manganeso. También se emplea en la fabricación de cerámica,

cerillas, vidrio y tintes. Algunas sales de manganeso son empleadas como fertilizantes.

El manganeso presenta características tóxicas en lugares donde se efectúan operaciones de limpieza en canales que promueven condiciones Redox, generando una gran movilidad de este elemento y enriqueciendo a las aguas, al menos localmente en niveles preocupantes (Hellawell, 1989). El permanganato de potasio (KMnO_4) es un agente oxidante comúnmente empleado en sistemas acuáticos para mejorar la disponibilidad de oxígeno, tratar infecciones, parásitos y controlar la población algal.

1.4.6 ZINC (Zn)

El zinc (Zn) se encuentra distribuido en la naturaleza y constituye aproximadamente un 0,02 % de la corteza terrestre. Adopta la forma de esfalerita (ZnS), carbonato, óxido o calamina ($\text{Zn}_4\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$), combinado con muchos minerales. La esfalerita, el principal mineral de zinc y fuente de al menos el 90 % del zinc metálico, contiene hierro y cadmio como impurezas. Casi siempre aparece acompañado de galena (PbS), y ocasionalmente se encuentra asociado con minerales que contienen cobre u otros sulfuros metálicos básicos.

El Zinc es esencial en la síntesis de ADN, en procesos implicados en la inmunidad, en curación de heridas, percepción del sentido del gusto, síntesis de esperma y el desarrollo físico normal. Se han encontrado niveles elevados de Zn en gónadas de peces, sobre todo en hembras porque juega un papel fisiológico esencial en la fertilización y por tanto, se almacena como reserva en los ovocitos (Hamza-Chaffai *et al.*, 1996).

Se emplea para formar aleaciones con otros metales, como el níquel, aluminio y cobre. Otro uso, también muy extendido, es la galvanización, para prevenir la corrosión de otros metales como el hierro. El óxido de Zn se utiliza en pinturas,

cosméticos, productos para farmacéuticos, plásticos, baterías, textiles y el sulfuro de Zn se utiliza en fluorescencia, rayos X y pantallas de TV.

En el ambiente acuático varios factores, como la dureza del agua, salinidad, temperatura, y la presencia de otros contaminantes, influyen en la disponibilidad de Zn y en la absorción o unión de zinc a los tejidos biológicos. Se han detectado efectos adversos en organismos acuáticos, como la aparición de manchas o daño en branquias. Algunas de las manifestaciones clínicas de los déficits crónicos de Zn en el hombre son el retraso del crecimiento, las alteraciones cutáneas, la falta de apetito, el letargo mental y el retardo en la cicatrización de las heridas (Nordberg, 1998).

1.4.7 COBRE (Cu)

El cobre se encuentra principalmente en minerales en los que el ^{63}Cu constituye el 69.1 % y el ^{65}Cu el 30.9 % del elemento. El cobre está ampliamente distribuido en todos los continentes y forma parte de la mayoría de los organismos vivos. Aunque se han encontrado algunos depósitos naturales de cobre metálico, generalmente se extrae en forma de sulfuros, como covelita (CuS), la calcocita (Cu_2S), la calcopirita (CuFeS_2) y la bornita (Cu_3FeS_3); o de óxidos, como la malaquita ($\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$), la crisocola ($\text{CuSiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y la calcantita ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$). Debido a sus propiedades eléctricas, más del 75 % del cobre que se produce se utiliza en la industria eléctrica.

Entre otros usos de este metal se encuentra la fabricación de cañerías para el agua, material para techumbres, baterías de cocina, equipos químicos, farmacéuticos y producción de aleaciones de cobre. El cobre metálico se utiliza como pigmento y como precipitante del selenio. Su toxicidad se atribuye principalmente al Cu (II), el cobre forma complejos fácilmente con una gran variedad de sustancias que se encuentran tanto en aguas limpias como en aguas contaminadas (Rodríguez, et al., 2005).

Se ha observado daño en fibras musculares y la destrucción del tejido conectivo en el ostión, mientras que en los peces presenta actividad inmunosupresora, volviéndolos más susceptibles a infecciones secundarias (Rodríguez, et al., 2005).

1.4.8 NÍQUEL (Ni)

El níquel (Ni) representa entre el 5-50 % del peso de los meteoritos y se encuentra en forma de minerales, combinado con azufre, oxígeno, antimonio, arsénico o sílice. Los principales depósitos de minerales de níquel se encuentran en Canadá, Rusia, Australia, Nueva Caledonia, Indonesia y Cuba. El níquel es un metal usado en una variedad de productos industriales, como: acero inoxidable y otras aleaciones resistentes a la corrosión, baterías recargables, imanes y monedas.

Un factor importante en todas las rutas de absorción del níquel es la solubilidad; así los cloruros, sulfatos y nitratos de níquel son solubles en agua, mientras que los carbonatos, sulfuros y óxidos no lo son. En los sistemas biológicos el níquel disuelto, forma complejos y se liga a la materia orgánica (IPChS, 1991). Está presente en pequeñas cantidades en el agua de mar, en el petróleo y en la mayor parte del carbón (Lenntech, 2011).

La toxicidad es alta, ya que a bajas concentraciones es nocivo para los organismos acuáticos, de manera que origina la muerte de peces. La sobreexposición al níquel causa en humanos irritación en la piel, daño al corazón y al hígado. La aparición de tumores y lesiones al ADN se deben a la oxidación de Ni (II) a Ni (III).

1.4.9 CROMO (Cr)

El cromo elemental (Cr) no se encuentra como tal en la naturaleza; el único mineral de cromo importante es el cromito ferroso (FeOCr_2O_3), que está ampliamente distribuido en la corteza terrestre.

Los compuestos que contienen Cr (VI) se utilizan en muchos procesos industriales, entre los que cabe destacar: la fabricación de importantes pigmentos inorgánicos

como los cromatos de plomo, los naranjas de molibdato, el cromato de zinc y el verde de óxido crómico; la conservación de la madera; la fabricación de anticorrosivos; y la fabricación de vidrios y esmaltes de color.

Otros usos conocidos de los compuestos químicos de cromo son la estampación de telas, la preparación de numerosos catalizadores importantes que contienen óxido crómico y la producción de coloides dicromados sensibles a la luz para litografías. El ácido crómico se utiliza no sólo para el cromado “decorativo”, sino también para obtener una superficie más resistente con un bajo coeficiente de fricción. De la potente acción oxidante de los cromatos en solución acidulada se derivan muchas aplicaciones industriales, especialmente con materiales orgánicos, como la oxidación del trinitrotolueno (TNT) para producir fluoroglucinol y la oxidación de la picolina para obtener ácido nicotínico.

Los compuestos de Cr (III) son menos peligrosos que los compuestos de Cr (VI). Los primeros no se absorben fácilmente en el aparato digestivo por lo que no producen ulceraciones ni suelen producir dermatitis alérgica como en el caso de los segundos que es muy fácil su penetración al interior de las células (Villanueva, et al., 1992).

La toxicidad del cromo en sistemas acuáticos depende de la solubilidad y esta varía según la temperatura, pH y dureza del agua. Los compuestos de Cr (VI) se disuelven con facilidad, pero en condiciones naturales y en presencia de materia orgánica oxidable, se reduce a compuestos de Cr (III) más estables y menos hidrosolubles que se fija al sedimento acuático (Rouhi, 1999).

1.4.10 ESTAÑO (Sn)

El estaño se ha utilizado desde la antigüedad hasta la industria moderna porque es dúctil a temperaturas bajas y forma fácilmente aleaciones con otros metales. Las combinaciones con cloro, azufre u oxígeno se usan para la fabricación de pasta dental, perfumes, jabones, aditivos para alimentos y colorantes. El estaño se combina con carbono para formar dibutilestaño, tributilestaño y trifenilestaño. Estos

compuestos se usan para fabricar plásticos, envases para alimentos, cañerías plásticas, plaguicidas, pinturas marinas anti-incrustantes.

El tiempo de vida del estaño es breve, pero alcanza concentraciones relativamente altas en el agua de mar, particularmente en las bahías y puertos donde permanecen los navíos por periodos largos. El tributil estaño causa daños severos a las especies marinas, a los ostiones les provoca deformidades en el crecimiento (Mee, 1989).

1.4.11 ALUMINIO (Al)

El aluminio es el metal más abundante en la corteza terrestre, donde se encuentra combinado con oxígeno, flúor, sílice, etc., pero nunca en estado metálico. La principal fuente de aluminio es la bauxita (Al_2O_3) y contiene hasta un 55 % de alúmina. Se utiliza a menudo en la fabricación de utensilios de cocina, envases, materiales de construcción, producción de vidrio, gomas, cerámicas y antiácidos.

El Al (III) es altamente reactivo, tiende a formar sales solubles en medio ácido y compuestos aluminatos solubles ($\text{Al}(\text{OH})_4$) en medio alcalino. En el intervalo de pH de 6.5 a 7.5 se forman hidróxidos insolubles $\text{Al}(\text{OH})_3$. La toxicidad del aluminio soluble dependerá del pH, entre otros factores. Se ha demostrado que el Al tiene efectos perjudiciales en la salud como: daños al sistema nervioso central, pérdida de memoria y temblores si se ingiere a altas concentraciones (mayores a 0.2 mg L^{-1}), también afecta el desarrollo de los peces u otros organismos hidrobiológicos y por último presenta efectos de alta mortalidad.

1.5 SQuiRTs

Las concentraciones máximas permisibles de metales en sedimentos se reportan en la tabla de la National Oceanic and Atmospheric Administration Screening Quick (NOAA SQuiRTs-Buchman, 2008), en ellas se identifican los impactos potenciales a los recursos costeros y hábitats por desechos peligrosos. La concentración total de los metales se compara con los valores registrados en los SQuiRTs de NOAA. Abajo

del nivel de efecto umbral (TELs) rara vez ocurren efectos adversos. En el intervalo de efecto bajo (ERL) comienza a ser tóxico en especies sensibles. En los niveles de efecto probable (PELs) se esperarán efectos adversos. En el presente trabajo utilizaremos el intervalo de efecto bajo como medida preventiva en la evaluación del daño probable de metales a la fauna bentónica del sistema de estudio.

1.6 ÁREA DE ESTUDIO

Ría Lagartos se localiza en el extremo oriental de la franja litoral del Estado de Yucatán, al norte limita con el Golfo de México y al este con Quintana Roo. Abarca una superficie de 60,347 hectáreas y presenta una gran diversidad de ambientes, como manglares, selva mediana subperennifolia (25 a 50% de las especies pierden las hojas), selva baja caducifolia (más del 75% de las especies pierden sus hojas), vegetación de dunas costeras, petenes (isletas), sabana representada por tular (zonas pantanosas), pastizales y carrizales (pantano). En conjunto, estos sistemas sustentan una alta diversidad florística y faunística en relación con áreas continentales de tamaño similar.

Los humedales tienen amplio reconocimiento ya que presentan un número apreciable de especies o subespecies vegetales o animales raros, vulnerables o en peligro de extinción, como es el caso del pato real mexicano, entre muchas otras especies. El humedal soporta el mayor número de parejas anidantes (80%) de una población biogeográfica (de una especie o subespecie de aves acuáticas), en este caso el flamenco rosa del Caribe. También representa un ejemplo específico de un tipo de comunidad característica de zona climática. La elevada productividad biológica, desde condiciones de salinidad hasta hipersalinidad marina en un ambiente cárstico (suelo carbonatado) hace que los humedales de Ría Lagartos sean un ejemplo único en el mundo. (CONANP, 2007). La localización de las estaciones de muestreo se presenta en la Figura 1 y la tabla 1.

Tabla 1. Localización de las estaciones de muestreo de la laguna Ría Lagartos.

Estación	Latitud Norte	Longitud Oeste
1	21°34'14.09"	88°14'23.06"
2	21°34'10.85"	88°13'49.81"
3	21°34'15.43"	88°12'59.94"
4	21°34'48.77"	88°12'47.75"
5	21°35'10.9"	88°12'36.0"
6	21°34'44.26"	88°11'58.47"
7	21°35'29.42"	88°11'24.20"
8	21°35'29.09"	88°10'51.09"
9	21°35'43.31"	88°09'55.08"
10	21°35'58.27"	88°09'02.21"
11	21°35'48.8"	88°09'38.4"

1.7 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ÁREA DE ESTUDIO

1.7.1 FISIOGRAFÍA

El área (74 kilómetros) se ubica en la provincia fisiográfica denominada Región Peninsular Yucateca. Es una plataforma caliza formada por rocas sedimentarias cretácicas que descansan en formaciones terciarias, donde no existen corrientes superficiales y el agua se filtra formando un manto freático de poca profundidad compuesto por grutas, corrientes subterráneas y cenotes. Se encuentra en una zona asísmica (INE, 1999).

1.7.2 EDAFOLOGÍA

Los suelos de la reserva derivan de sedimentación marina reciente, del intemperismo de roca caliza y de procesos climáticos que actúan con la vegetación, propiciando que se encuentren en estado transitorio y proceso evolutivo. Según la FAO (Food

and Agriculture Organization), los suelos de Ría Lagartos corresponden al orden azonal, significando que el desarrollo del perfil es joven y está sujeto a un movimiento continuo por acción de vientos, flujo laminar e inundación por mareas (CONANP, 2007).

1.7.3 HIDROLOGÍA

La Península de Yucatán está formada por una plataforma sedimentaria de roca caliza porosa. No posee un sistema superficial de corrientes de agua dulce permanente, sino un flujo de agua subterránea por la fácil filtración del agua pluvial. Cuando la roca es disuelta por efecto del agua, causa desplomes, originando los cenotes.

La Ría posee cuatro conexiones con el mar: dos naturales, la boca de San Felipe y la de Chipepte, y dos artificiales, el canal de San Felipe y el de Río Lagartos. La amplitud varía de 25 m a 3.5 Km, la profundidad oscila entre 0.5 y 3 m, la longitud se aproxima a 74 Km y la extensión del espejo de agua es de 9,371 ha. El volumen de agua se aproxima a los 130 millones de metros cúbicos. Su conexión con el mar, baja renovación de aguas internas, aunado a que la evaporación supera la precipitación, ocasiona que las aguas aumenten su salinidad. En la época de Lluvias y Nortes existe mayor flujo de agua y menor salinidad, permitiendo mayor oxigenación y enfriamiento relativo del agua, así como un aumento del nivel de la laguna (CONANP, 2007).

El sistema de Ría Lagartos presenta tres cuencas: Río Lagartos, Las Coloradas y El Cuyo comunicadas entre sí por estrechos naturales “El Puente y La Angostura”. En la cuenca de Las Coloradas se presenta el estrecho de “San Fernando”, que aparentemente juega un papel importante en el flujo de agua en esta cuenca y entre ésta y la de El Cuyo (INE, 1999).

El escaso intercambio con el mar abierto y que la evaporación supera a la precipitación ocasiona que las aguas relativamente inmóviles del estero aumenten su salinidad con el transcurrir del tiempo. En la cuenca de El Cuyo la salinidad rebasa

los 100 ppm, en los reportes de Zamacona (1983) y Allen (en Hernández, s/f) se mencionan 180 ppm. En las temporadas de “Lluvias” y “Nortes” fluye agua menos salina, que permite una mayor oxigenación y un enfriamiento relativo del agua, así como un aumento del nivel de la laguna. En la zona de humedales de la Reserva existen irregularidades topográficas que varían entre 1 y 3 m. En estos lugares aflora agua dulce de muy baja salinidad (2 ppm), lo que permite el establecimiento de comunidades de gran diversidad llamadas “petenes” o “islas de vegetación”. También existen aguadas, que son cuerpos de agua temporales (INE, 1999).

1.7.4 CLIMATOLOGÍA Y ESTACIONALIDAD

La reserva tiene un clima cálido subhúmedo, con temperatura anual promedio mayor a 22 °C (aún en el mes más frío es mayor a 18 °C). La precipitación en el mes más seco es menor a 60 mm y el porcentaje de precipitación invernal está entre 5 % y 10.2 % En la zona se presentan dos estaciones marcadas, la de lluvias de junio a noviembre y la de secas de diciembre a mayo. Los vientos predominantes en la zona son los aliseos con dirección de noreste al suroeste; de septiembre a octubre se considera época de Nortes y huracanes con presencia de fuertes vientos.

1.7.5 FAUNA

La reserva cuenta con una gran diversidad de fauna, representada por 597 especies de vertebrados; 58 especies de mamíferos, 373 especies de aves, 95 especies de anfibios y reptiles y 71 especies de peces. En cuanto a la avifauna se han registrado 180 especies residentes, 155 migratorias, 22 residentes-migratorias, siete especies accidentales y nueve ocasionales, todas pertenecientes a 58 familias. De estas especies, 47 están incluidas en la NOM-059-SEMARNAT-2001, seis en Peligro de Extinción, ocho Amenazadas y 33 bajo Protección Especial. Asimismo, hay 48 especies dentro de los apéndices de CITES; 56 especies endémicas, ya sea a nivel Mesoamérica, México o regiones más limitadas, de ellas tres son endémicas de la Península de Yucatán, con distribución restringida y 32 de uso tradicional (CONANP 2007).

1.7.6 VEGETACIÓN

Entre la flora de la Reserva se encuentran numerosas especies de afinidad caribeña, ciertos ejemplares sólo se encuentran representadas para México en los estados que colindan con el Mar Caribe, Yucatán y Quintana Roo. Entre estas encontramos a la flor de mayo (*Plumeria obtusa*) kuká (*Pseudophoenix sargentii*) chit (*Thrinax radiata*) tasiste (*Acoelorrhaphe wrightii*) y palma real (*Roystonea regia*). La Reserva posee registros de más de 715 especies de plantas de las 2,575 registradas en la Península de Yucatán, 63 son endémicas en la Península de Yucatán y 203 se consideran de uso tradicional a nivel regional. La presencia del mosaico vegetal, permite la existencia de gran diversidad de fauna representada por especies de los 5 grupos de vertebrados. Las 557 especies reportadas en la Reserva incluyen 142 endémicas a Mesoamérica, de las cuales 15 son endémicas de México y una a Yucatán.

1.7.7 DEMOGRAFÍA

Dentro del área se encuentran tres poblaciones (cabeceras municipales): Ría Lagartos, San Felipe y Tizimín. El municipio de Río Lagartos tiene 3,438 habitantes (50.87% hombres y 49.13% mujeres); San Felipe 1839 habitantes (51.98% hombres y 48.01% mujeres) y la localidad de Tizimín tiene 73138 habitantes (49.86% hombres y 50.13 % mujeres) (INEGI, 2010).

2. HIPÓTESIS

En Ría Lagartos, Yucatán, el As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Sn y Zn presentarán una variación espacio-temporal significativa relacionada con la geoquímica del sitio e influenciada por las fuentes puntuales de metales como: desagües urbanos, tiraderos informales, actividades agropecuaria, actividad marítimo-portuaria, gasolineras e industrias.

Es probable que existan concentraciones de As y metales en los sedimentos que superarán los límites recomendados por instituciones internacionales donde hay presencia de fuentes antropogénicas.

3. JUSTIFICACIÓN

En la laguna de Ría Lagartos las diversas actividades industriales, turísticas y asentamientos humanos producen desechos sólidos y líquidos que se depositan en los alrededores y son vertidos en la laguna sin tratamiento y con total desconocimiento de la concentración de metales que contienen. La laguna de Ría Lagartos ofrece un sinnúmero de servicios ecosistémicos y debido a sus características físicas, geológicas y químicas es una zona vulnerable a impactos antropogénicos.

En los últimos años se han desarrollado numerosos estudios para determinar la concentración de los contaminantes en sedimentos, como los metales, que son vertidos en las diferentes fuentes hídricas con el objetivo de conocer su destino y su efecto sobre el medio ambiente (Baena, 2005).

Una característica importante es la variación espacio-temporal de la concentración de metales en el intercambio hidráulico con el mar adyacente: ya que a menor intercambio, mayor es el tiempo de residencia de los metales en la laguna. Así también, el suelo de la zona permite que los metales se adsorban a los sedimentos y se depositen.

Ría Lagartos se distingue por presentar altas salinidades en su porción centro y oriente, lo que favorece una biodiversidad muy distinta a la de otras lagunas, además de permitirle soportar en sus márgenes una industria salinera. Esto ha sido utilizado en múltiples formas: turismo, actividad cinegética de aves acuáticas, aprovechamiento de manglar y diferentes tipos de pesquerías; mismas que han generado problemas de contaminación, modificación de flujos de agua, entre otros. Por su morfología larga y estrecha, con entrada de agua marina sólo en su porción oeste es muy vulnerable a la contaminación (Herrera-Silveira et al., 2007).

Lo expuesto anteriormente indica que en la zona existe una serie de circunstancias que incrementa la concentración de As y otros metales provocando así que no se cumpla con los niveles permisibles internacionalmente.

Los resultados obtenidos en este trabajo permitirán tomar una decisión informada que promueva el uso del sitio dentro de la filosofía del desarrollo sostenible.

4. OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar la variación espacio-temporal de As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Sn y Zn en sedimentos recientes, durante un ciclo anual, en la laguna de Ría Lagartos, Yucatán y comparar sus niveles con normas internacionales para identificar el probable daño al sistema.

4.2 OBJETIVO PARTICULARES

1. Determinar a lo largo de un año, la variación de metales en sedimentos para establecer el estado de contaminación actual comparando los resultados obtenidos contra niveles permisibles internacionales.
2. Determinar si las variaciones espaciales y temporales del As y metales están relacionadas con las características geoquímicas del sedimento durante Lluvias, Nortes y Secas.
3. Identificar las fuentes antropogénicas productoras de metales en la periferia de la laguna y determinar si las estaciones cercanas a las mismas presentan mayor concentración de los analitos.

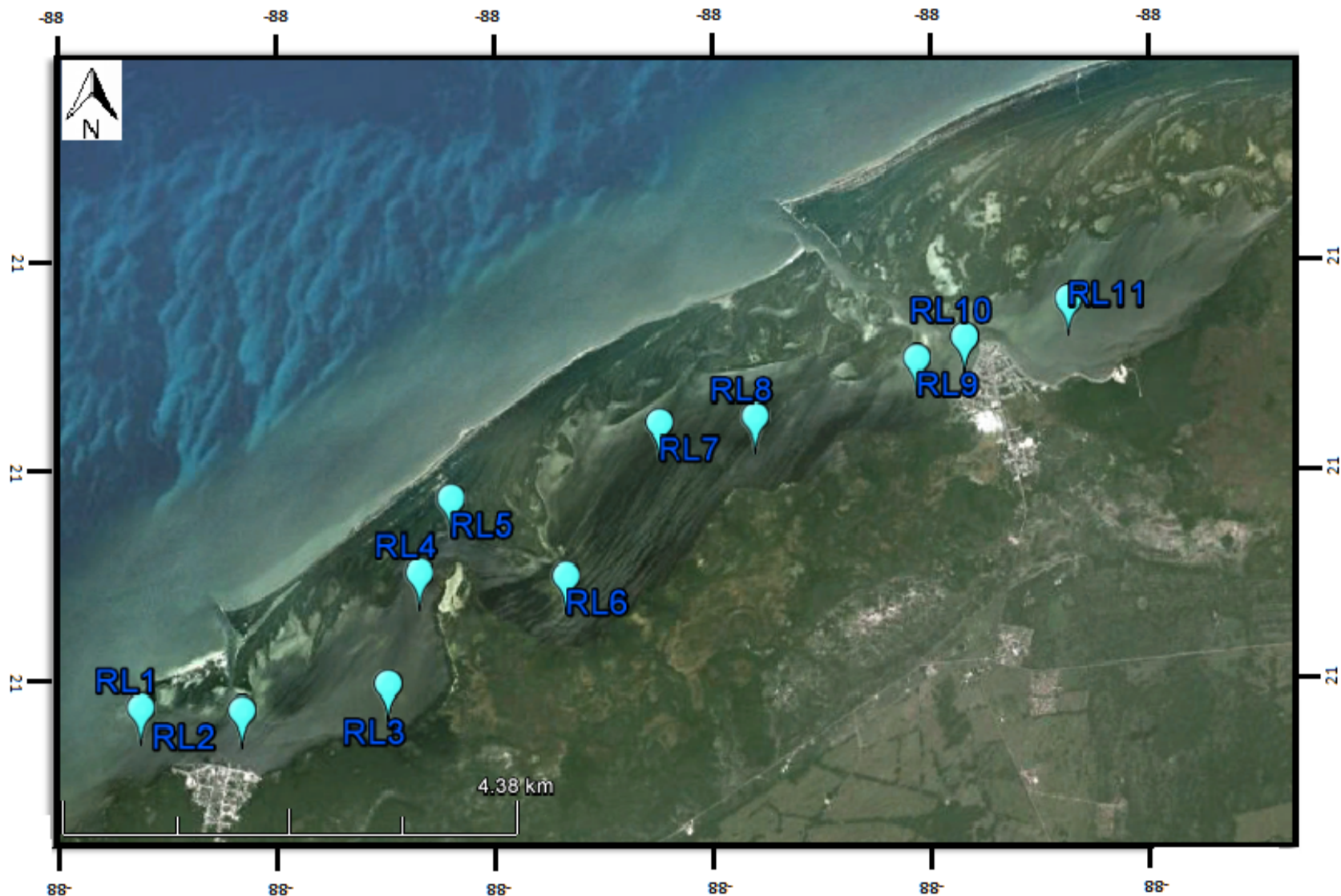


Figura 1. Puntos de muestreo de Ría Lagartos, Yucatán

Autor: Luis Tello de Meneses Vega

Fuente: Google earth

Proyecto: Variación anual de As y metales en sedimentos de Ría Lagartos, Yucatán.

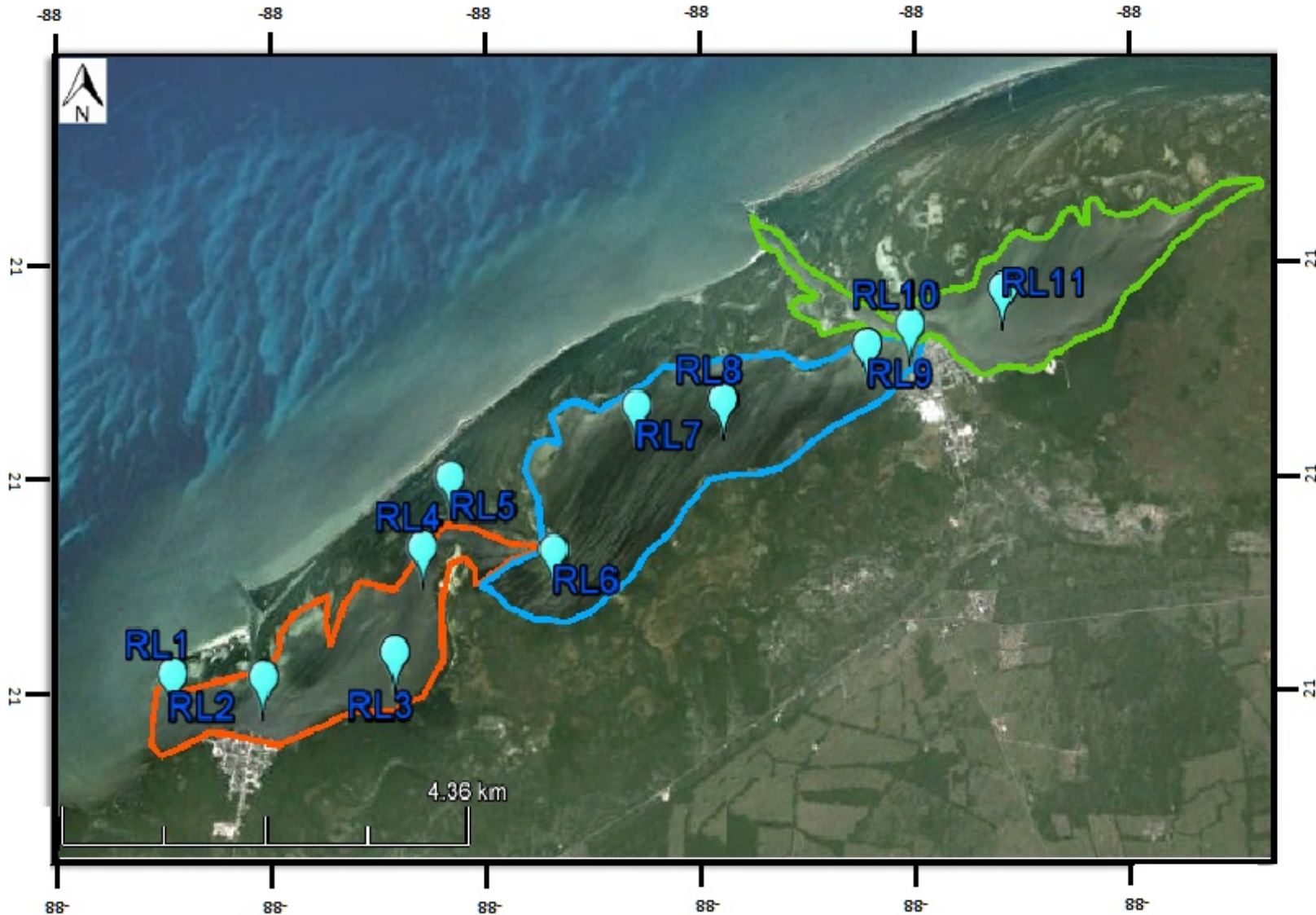


Figura 2. Zonificación de Ría Lagartos, Yucatán

- Zona léntica: interacción continúa entre el agua de la laguna y el ambiente marino.
- Zona de azolve: El azolve se debe a la disminución de la velocidad de la corriente y a la correspondiente disminución de la cantidad y el tamaño del material sólido que es arrastrado en suspensión
- Zona de transición: Recibimiento y salida de aguas continentales

Autor: Luis Tello de Meneses Vega

Fuente: Google earth

Proyecto: Variación anual de As y metales en sedimentos de Ría Lagartos, Yucatán.

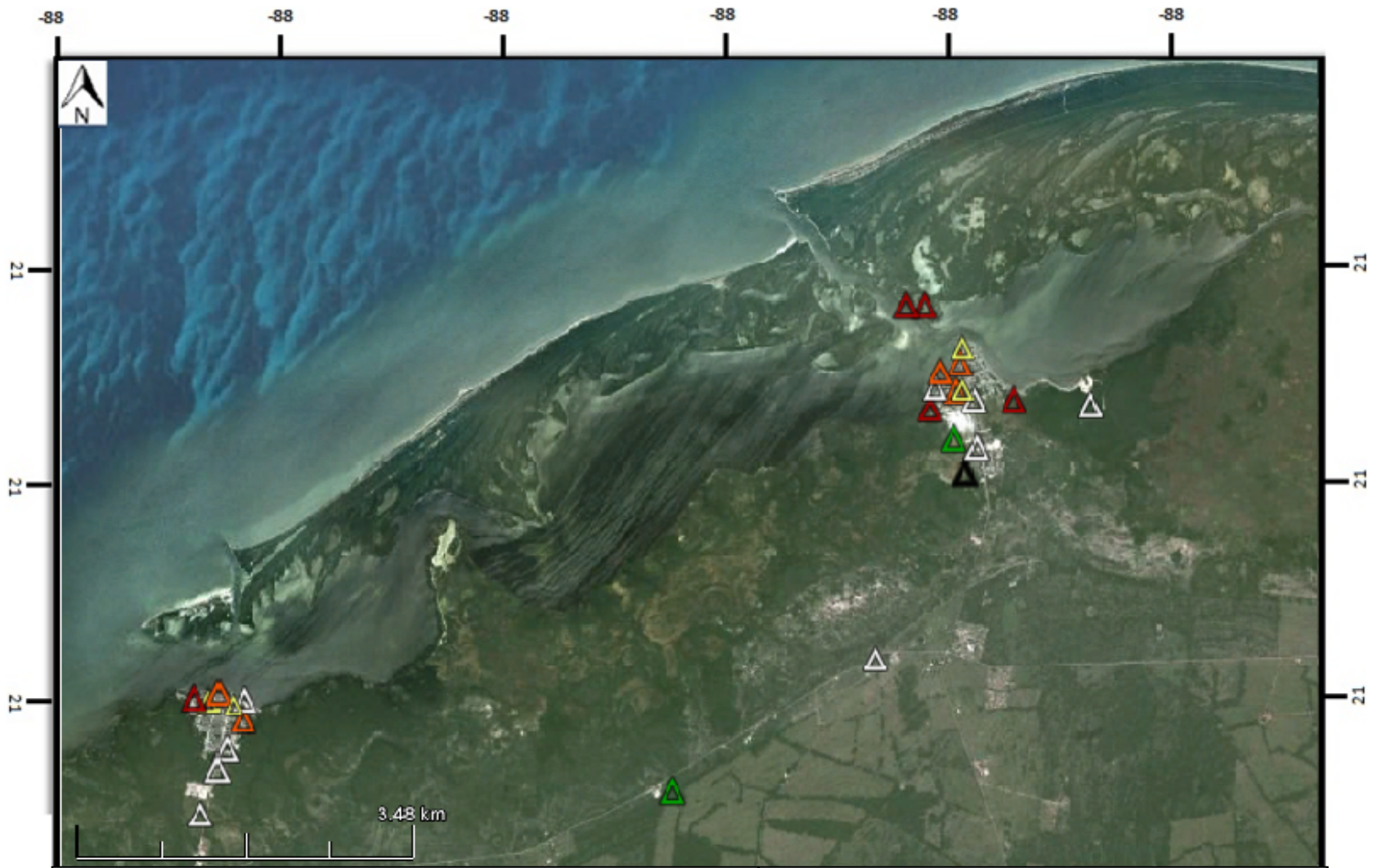


Figura 3. Fuentes de Contaminación de Ría Lagartos, Yucatán

-  Tiraderos Informales
-  Actividad marítimo-portuaria
-  Actividad agropecuaria
-  Gasolinera
-  Industria
-  Desagües urbanos

Autor: Luis Tello de Meneses Vega

Fuente: Google earth

Proyecto: Variación anual de As y metales en sedimentos de Ría Lagartos, Yucatán.

5. ANTECEDENTES

Las lagunas costeras son un rasgo fisiográfico muy importante de las costas de la Península de Yucatán, donde se desarrollan diferentes actividades impulsadas por su productividad, atractivo escénico y biodiversidad. Sin embargo, los servicios ambientales de algunas de ellas se han reducido a consecuencia del incremento en las descargas de aguas residuales, modificaciones hidrológicas y cambios de uso de la tierra. La zona norte de la península de Yucatán no presenta escurrimientos superficiales, y por su suelo cárstico permeable existe descarga de aguas dulces del acuífero en la costa a través de afloramientos, lo que convierte a las lagunas costeras de esta zona en un sistema único de las costas mexicanas. La carencia de un sistema de drenaje y tratamientos de aguas residuales promueve el aporte de metales como Pb, Cd, As, Fe, Mn, Cu, Ni, Cr, Sn y Zn entre otros a los sistemas costeros.

Ría Lagartos está situada entre los municipios de San Felipe, Ría Lagartos y Tizimín. La zona fue declarada como Reserva Especial de la Biósfera en el año de 1979. Su nombre de Ría, lo debe a la particularidad geográfica que presenta la península yucateca, pues a diferencia de otras regiones del país, aquí no existen los ríos, sino unas formaciones de características similares denominadas rías, las cuales son entradas de mar que confluyen con masas de agua dulce provenientes de los mantos freáticos que afloran en la costa.

Ría lagartos ha sido objeto de diversos estudios, tanto de su vegetación, producción primaria y condiciones fisicoquímicas, entre ellos están los realizados por Espinoza (2010) sobre la dinámica y potencial tóxico de metales en Ría Lagartos, Yucatán.

En este trabajo Espinoza revela que los metales que no rebasan los límites propuestos por la NOAA SQuiRTs son Cd, Cr, Cu, Mn, Ni y Zn, pero la fracción biodisponible excede el 50 %, lo que indica que estos elementos ingresan a la red trófica, pero al tener una concentración demasiado baja su presencia no implica un riesgo considerable. El As por otro lado sobrepasa los límites que reporta la NOAA SQuiRTs ocasionando un efecto mínimo, pero este no representa un riesgo elevado

ya que la mayoría de As corresponde a la fracción residual, por lo que es muy poco probable que se desorba de los sedimentos.

6. METODOLOGÍA

6.1 RECOLECCIÓN Y ALMACENAMIENTO DE SEDIMENTOS

Se recolectaron las muestras de sedimentos del sistema de Ría Lagartos en el periodo comprendido entre agosto 2011 y mayo 2012. Con base a lo planteado se determinaron las variaciones temporales y espaciales de la concentración de metales tomando en cuenta las tres estaciones predominantes (Secas, Lluvias y Nortes), por lo que se realizaron tres salidas de campo.

El área de estudio abarcó la longitud de Ría Lagartos entre las coordenadas 21°34'14.09" N, 88°14'23.06" O y 21°35'48.8" N 88°09'38.4" O. Se seleccionaron 11 sitios de muestreo siguiendo la dirección del flujo hídrico, características naturales del ambiente y la presencia de fuentes de contaminación cercanas, estableciendo así cinco puntos en la zona léntica, cinco en la zona de azolvamiento y solamente un punto en la zona de transición (Figura 2). Se determinaron las coordenadas con ayuda de un mapa satelital y el equipo GPS map 76CS X de marca Garmin (sistema de posicionamiento global) las coordenadas se ven en la Tabla 1.

Los parámetros fisicoquímicos se midieron en cada una de las 11 estaciones con la ayuda de la sonda HACH H40d, leyendo así la temperatura, salinidad, pH, oxígeno disuelto, conductividad y ORP. De acuerdo al procedimiento descrito por Loring y Rantala se recolectaron los sedimentos (1992). Los sedimentos se colocaron en bolsas de plástico, previamente lavadas con ácido nítrico, ácido clorhídrico y enjuagadas con agua destilada.

Las muestras se transportaron en hielera y se almacenaron en moldes de plástico para cubos de hielo y se mantuvieron a -70 °C en el Ultra-congelador (Thermo Scientific) durante 4 horas, posteriormente se desmoldaron y liofilizaron (Labconco, modelo Freezone 2.5) en un período de 48 horas para lograr la extracción del agua intersticial del sedimento, reteniendo la estructura mineral de las arcillas. Finalmente, las muestras liofilizadas se almacenaron en bolsas de cierre hermético hasta su tratamiento.

Después se pasaron por diferentes tamaños de poro, usando un juego de tamices (Standard Mesh), para remover materiales cuyo tamaño fuera mayor a 2 mm y así obtener la fracción que posee mayor influencia en la retención de metales (Ritcey, 1989) .

6.2 DIGESTIÓN ÁCIDA PARA METALES TOTALES EN SEDIMENTOS

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:

Se pesaron 0.5 g de sedimento y material de referencia de la NIST (National Institute of Standards and Technology) y se colocaron en tubos de teflón donde se adicionaron 9 mL de HNO₃ (J. T. Baker, A.C.S), 1 mL de HCl (J. T. Baker, A.C.S) y 3 mL de HF (Fermont, R.A.). Se realizó el mismo procedimiento para el tubo del sensor pero en este caso no se agrega HF para evitar que el ácido lo dañe.

Las chaquetas y tapas se colocan a los tubos de tal manera que sellaron y evitaron escurrimientos dentro del equipo. Se colocaron los tubos en el rotor y fueron introducidos en el horno de microondas. Se selecciona el programa EPA 3052 MF 100-T16 que tiene las siguientes condiciones para la digestión ácida de sedimentos (Tabla 2.)

Tabla 2. Condiciones de Temperatura para la digestión acida de sedimentos.

Fases	Temperatura (°C)	Tiempo de retención (min)	Ventilación
1	180	5	0
2	190	20	1
3	25	20	3

Transcurrido el tiempo de digestión se dejan enfriar las muestras y se transfieren a tubos de centrifuga graduados, aforándose a 50 mL con una solución de ácido nítrico al 0.2 % para regular el pH y disolver completamente los silicatos.

6.3 CUANTIFICACIÓN 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. La elección depende del metal que se desea cuantificar. Estas técnicas son muy útiles para el análisis de metales en muestras ambientales por su sensibilidad y selectividad. Se utilizaron lámparas específicas: de lámina HCl, para Al, Cu, Cr, Fe, Mn y Ni y EDL con adaptador electrónico, para As, Cd, Pb, Sn y Zn.

6.3.1 HORNO DE GRAFITO

Por la técnica de horno de grafito se cuantificó Cd, Pb, Sn, Ni, Mn y Cr. Ésta 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:

Se acondiciona el equipo y se verifica que el tubo de grafito esté en óptimas condiciones, se calienta la lámpara previamente una hora, se alinea el haz de luz y la punta. Se prepara 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 automáticamente hace las diluciones restantes para la curva de calibración). Se coloca en el auto-muestreador el blanco, el modificador de matriz, el stock y las muestras. Se obtiene la curva de calibración para posteriormente leer las muestras y hacer una recalibración cada 15 lecturas para asegurar la calidad del análisis.

6.3.2 GENERACIÓN DE HIDRUROS

El As solamente se cuantificó por generación de hidruros, ya que es muy difícil de volatilizar con llama u horno y con esta técnica se incrementa la eficiencia de atomización. Se incrementa su selectividad porque separa al analito 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 arsénico 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. El procedimiento es el siguiente:

Se preparar la curva de calibración de 0, 5, 10, 15, 20 ppb's en matraces de 50 mL, se adicionan 500 μ L de HCl concentrado, 60 de μ L KMnO_4 al 5% y al final se afora con agua destilada a 25mL. Posteriormente y en el orden descrito se adicionan: 2 mL de muestra, 250 μ L de HCl concentrado, 30 μ L de KMnO_4 al 5% y se afora a 25 mL con agua destilada. A continuación la curva de calibración y las muestras se transfieren a tubos de centrifuga de 50 mL y 15 mL, respectivamente, para después colocarlos en el muestreador automático. Antes de llevar a cabo el análisis se deben medir los flujos del acarreador (HCl al 10%) y NaBH_4 al 0.2% que son de 7 y 5 mL min^{-1} respectivamente, la lámpara debió encenderse una hora antes.

6.3.3 LLAMA DE AIRE/ACETILENO

La técnica de llama se utilizó para cuantificar Fe, Cu y Zn, ya que son muy abundantes en las muestras y la sensibilidad no debe ser tan alta.

Es necesario optimizar los parámetros del equipo como altura del quemador y el flujo de gas para obtener la mayor sensibilidad en el método. En esta técnica se deben preparar las disoluciones de la curva de calibración con la disolución estándar (Perkin Elmer) para cada metal. Después de obtener la curva de calibración en el equipo se leen las muestras y se recalibra cada 25 lecturas.

6.4 GRANULOMETRÍA

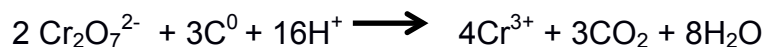
Con granulometría obtenemos la distribución por tamaño de las partículas en las muestras de sedimentos. Se pesa 500 g de muestra totalmente seca y se pasan por un juego de tamices (Standard Mesh Tyler/US) de diferente tamaño de malla (0.5 mm, 0.250 mm, 0.125 mm y 0.063 mm). Después se pesa cada fracción y se obtienen los porcentajes retenidos en cada una de las mallas, se guardan en bolsas con cierre hermético. La fracción correspondiente a limos y arcillas es menor a 0.063 mm y es donde se adsorben de manera preferencial los metales (Rubio y Ure 1993).

Tabla 3. Relación entre tamaño de malla del tamiz utilizado y el tipo de suelo que representa.

Tamiz	Material
0.5 mm-0.125 mm	Arenas
< 0.063 mm	Limos y arcillas

6.5 CUANTIFICACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA EN SEDIMENTOS

El método de oxidación de Walkley (1978) se utiliza para la cuantificación de materia orgánica. Se pesan 0.5 g de sedimento liofilizado que fue tamizado con malla de tamaño de luz >2 mm (para remover los materiales gruesos) y tamizado nuevamente con una malla con tamaño de luz =0.5 mm (para homogeneizarlo). Se coloca en un matraz Erlenmeyer de 500 mL se agregan 10 mL de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) 1 N y 20 mL de una disolución de sulfato de plata y ácido sulfúrico concentrado para eliminar la interferencia de los cloruros ($AgSO_4 \cdot H_2SO_4$, 1:80). Se mezcla suavemente y se deja reposar por 30 min, a continuación se agregan 200 mL agua destilada y 10 mL H_3PO_4 (para eliminar los iones férricos), posteriormente se valora la muestra con una solución de $FeSO_4$ 1N acidificado con H_2SO_4 usando como indicador a la difenilamina que vira a verde esmeralda al término de la valoración.



Para la estandarización del procedimiento se prepara un blanco (que lleva exactamente lo mismo pero sin agregar sedimento) y a partir del volumen de sulfato ferroso gastado en esta titulación se obtiene el factor F empleado para calcular el contenido de carbono orgánico. Se considera que 1 mL de $K_2Cr_2O_7$ es equivalente a 3 mg de carbono.

$$\% \text{ Materia Orgànica} = \frac{(10 - (V2 * F)) * 0.3}{g \text{ de sedimento}}; \quad F = \frac{10}{V1}$$

F= Factor de sulfato ferroso

V1= Volumen de sulfato ferroso empleado en la titulación del blanco

V2= Volumen de sulfato ferroso empleado en la titulación

6.6 LIMPIEZA DE MATERIAL

La limpieza del material se realizó siguiendo las especificaciones de la NMX-AA-051-SCFI-2001 donde se indica que el material para la determinación de metales es exclusivo para el procedimiento y debe tener el mismo pretratamiento. Se debe lavar con jabón y enjuagar con agua de la llave y posteriormente se remoja en ácido nítrico al 10% durante 2 horas y después se enjuagua con agua destilada.

6.7 ANÁLISIS ESTADÍSTICO Y MULTIVARIADO

El diagrama de cajas y bigotes se construyó para representar la variabilidad de los datos (se da la media y la desviación estándar). La mayor utilidad de los diagramas cajas y bigotes es comparar dos o más conjuntos de datos. Se efectuaron los siguientes análisis; de agrupamiento utilizando una correlación de Pearson y el método de Ward; de componentes principales, utilizando la matriz de datos y de factores con rotación varimax para obtener el mejor ajuste matemático. Dicha estadística se realizó con ayuda del programa (STATISTICA 7).

Los estudios se separaron de acuerdo a las temporadas de Lluvias, Nortes y Secas, para medir la variabilidad y los cambios en cada temporada. Solamente se tomaron en cuenta los parámetros más importantes en la retención de contaminantes en sedimentos como: contenido de materia orgánica, material fino y los carbonatos.

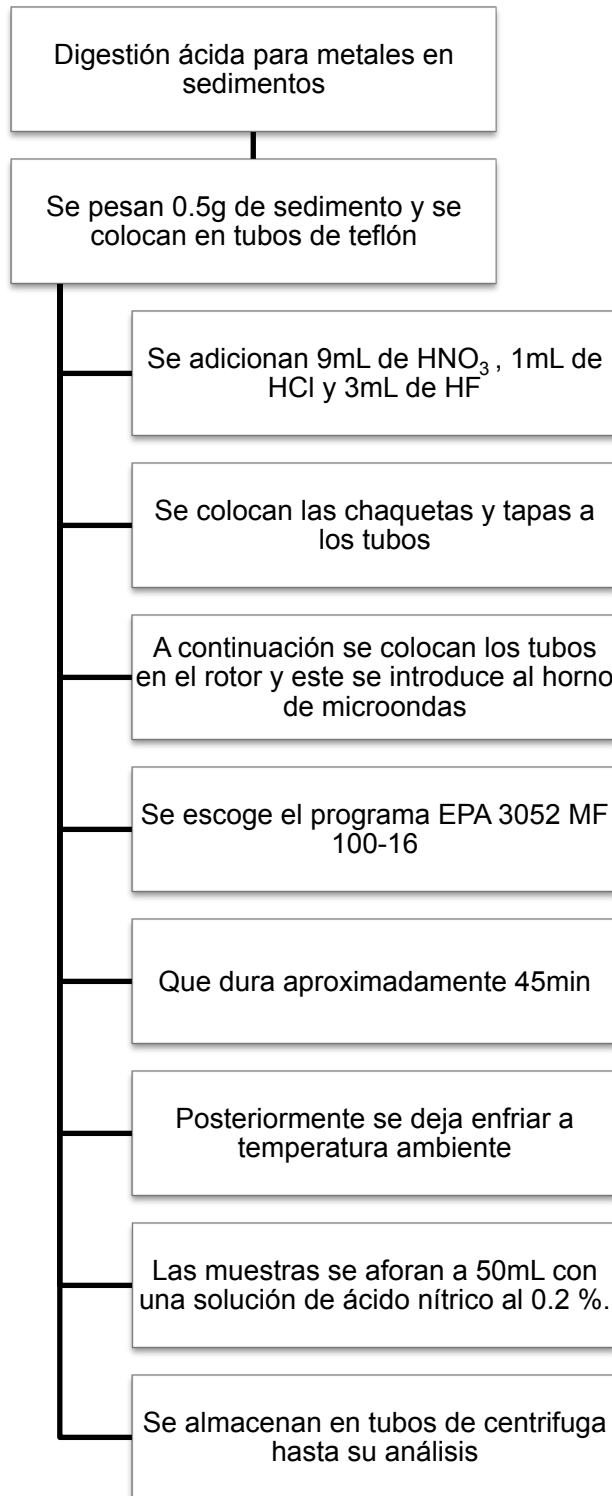


Figura 4. Diagrama de flujo de la digestión ácida para metales en sedimentos

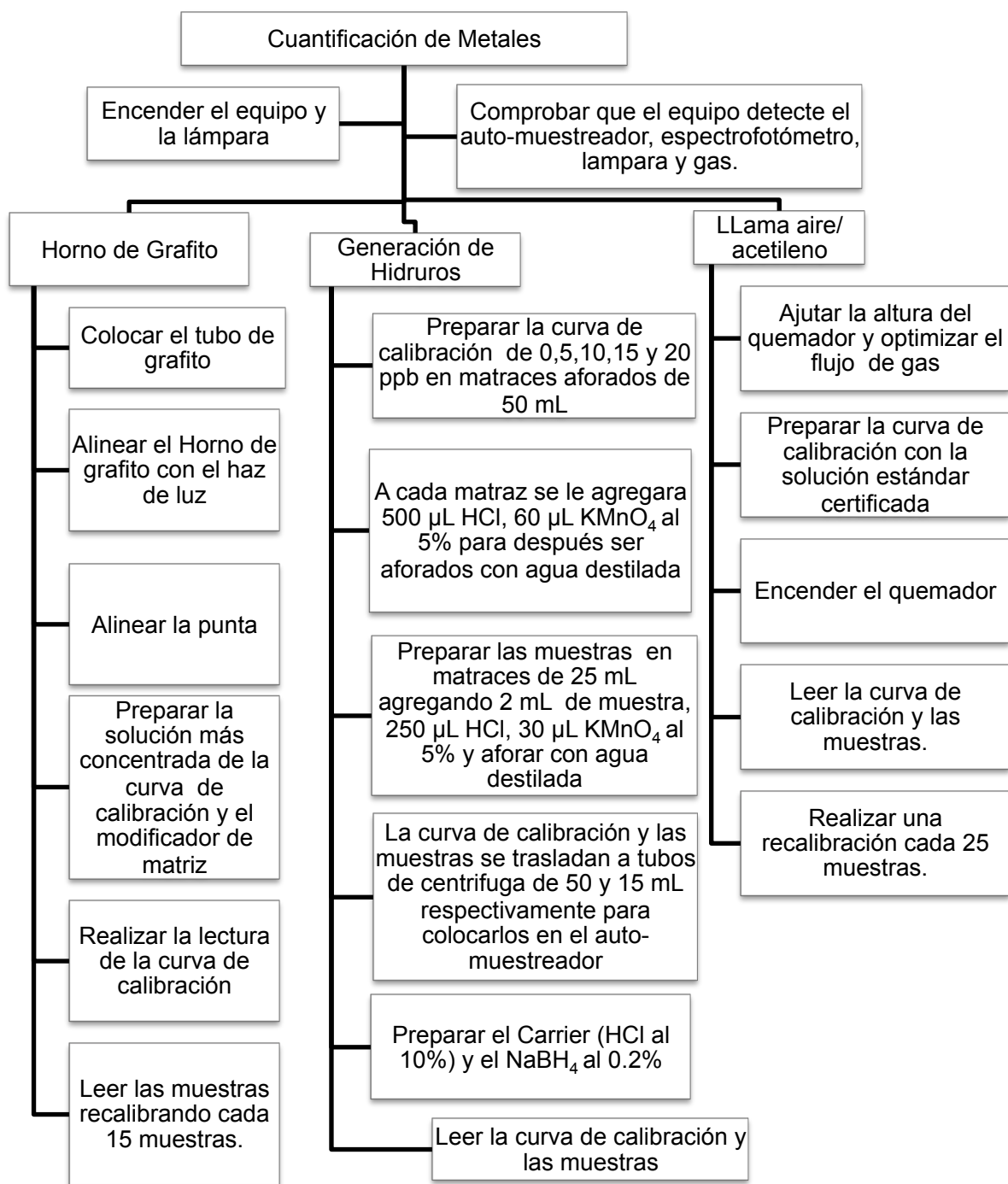


Figura 5. Cuantificación de metales por AA con Perkin Elmer Analyst 800

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las fuentes puntuales, que probablemente estén aportando metales en el área de Ría Lagartos se presentan en la Figura 3. Este proyecto reconoce como fuentes puntuales de metales: desagües urbanos, tiraderos informales de basura, actividad agropecuaria, actividad marítimo-portuaria (astilleros, atracaderos y embarcaderos), gasolineras e industrias (talleres mecánicos, de cromado y ferrotlapalerías).

En los poblados de Ría Lagartos y San Felipe es donde se encuentran la mayor cantidad de fuentes de contaminación. Se espera que las estaciones de muestro cercanas se vean afectadas por los metales que ingresan por desechos urbanos e industriales y lixiviados de basureros.

7.1 PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS

7.1.1 PROFUNDIDAD

Las variaciones en profundidad son relevantes para el comportamiento ambiental de los elementos al relacionarse con variaciones en salinidad, oxígeno disuelto, temperatura, porcentaje de material fino, etc. Por eso es relevante conocer la profundidad de todos los puntos de muestreo en Ría Lagartos. La variación temporal de profundidad presentó una diferencia significativa ($p < 0.05$) entre las estaciones climáticas pero se presenta una diferencia mayor en la época de Secas.

La Figura 6 indica que la profundidad en los puntos de muestreo varía poco con el cambio de temporada. Sólo se tiene un cambio drástico en RL5, donde disminuye la profundidad en temporada de Lluvias con respecto a las otras dos temporadas, esto se debe a que en esta época se dio un proceso de azolve en la zona (ver porcentaje de finos en Figura 12) que aportó una mayor cantidad de sedimentos.

En la Figura 6 se muestra la laguna dividida en estaciones, de RL1 a RL5 y de RL6 a RL10, por el meandro (cuello de cisne) que podría relacionarse con la geomorfología de la zona. RL1 a RL5 pertenece a la zona léntica (interacción continúa entre el agua de la laguna y el ambiente marino) caracterizada por tener dos entradas de agua marina que permiten el acceso continuo de aguas marinas. Como resultado se favorece la

renovación de agua y la remoción de sedimento. La zona comprendida entre RL6 y RL10 pertenece a la zona de azolve, esta sección está influenciada por la creación de un canal artificial que ocasiona la interrupción del empuje hidráulico natural de la laguna, ocasionado un proceso de azolvamiento. El aislamiento parcial de la zona y el tiempo de residencia evitan que el tiempo de renovación del agua sea acelerado.

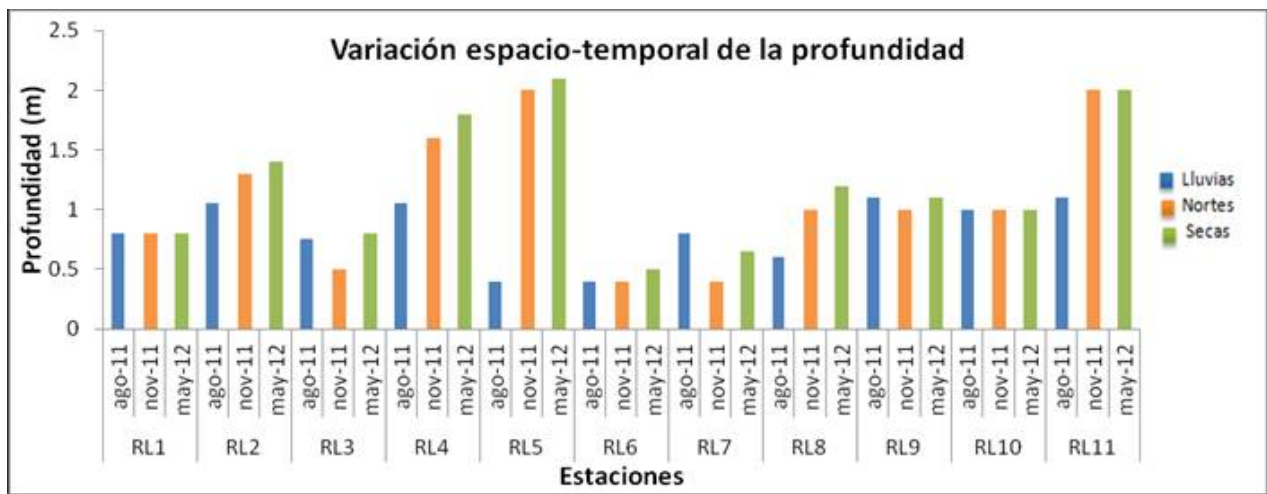


Figura 6. Variación espacio temporal de la profundidad

7.1.2 TEMPERATURA

La temperatura presenta una variación temporal significativa ($p < 0.05$). Se registró un valor promedio durante la temporada de Lluvias de $32.13\text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que en la temporada de Nortes se registró un promedio de $29.47\text{ }^{\circ}\text{C}$ y en temporada de Secas se obtuvo un promedio de $30.24\text{ }^{\circ}\text{C}$. Durante la temporada de Nortes la temperatura es baja debido, principalmente, a la influencia de los vientos y al menor tiempo de insolación por la cobertura de las nubes. Podría pensarse que en temporada de Secas la temperatura sería la más alta pero no es el caso. Tanto en Nortes como en Secas el valor de temperatura es muy similar, indicando que hay entradas de agua del acuífero que enfría la laguna. En la Figura 7 podemos analizar la variación de la temperatura, el valor más alto que se registra es en temporada de Lluvias en las estaciones comprendidas entre RL1 a RL7, indicando que está entrando agua fría del mar adyacente a las estaciones RL8 a RL11.

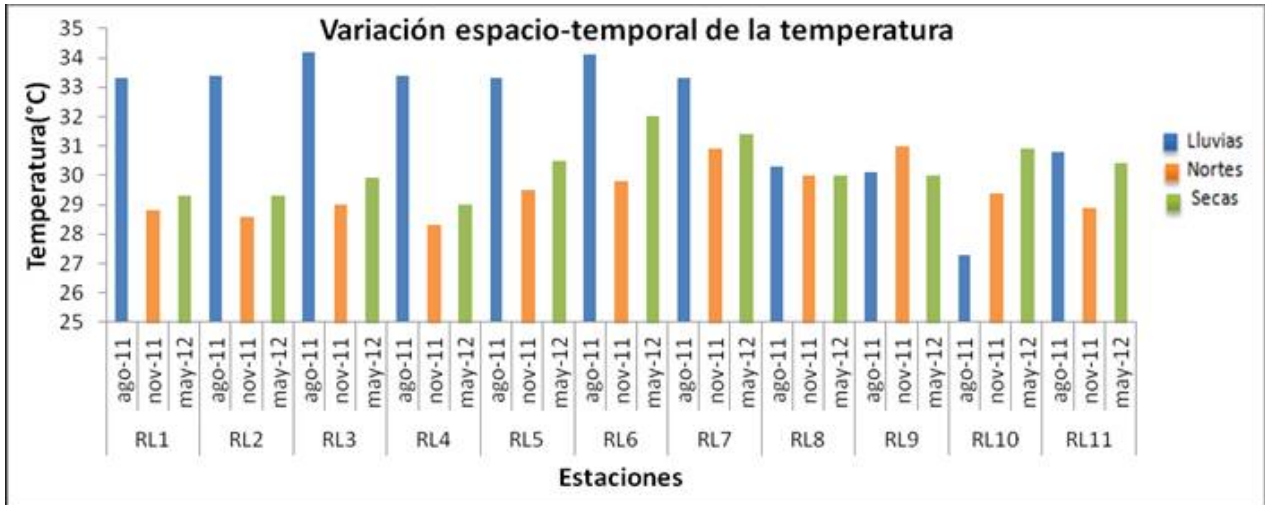


Figura 7. Variación espacio temporal de la temperatura

7.1.3 CONDUCTIVIDAD

La conductividad es un parámetro que se encuentra fuertemente relacionado con la cantidad de iones presentes (concentración total y movilidad), así como de la temperatura ya que a mayor temperatura menor viscosidad, y a menor viscosidad mayor libertad de movimiento; en este caso tiene mayor influencia la cantidad de iones presentes en el sistema (Figura 8). El comportamiento de las variaciones de conductividad y salinidad son similares, mientras que la temperatura varía mínimamente.

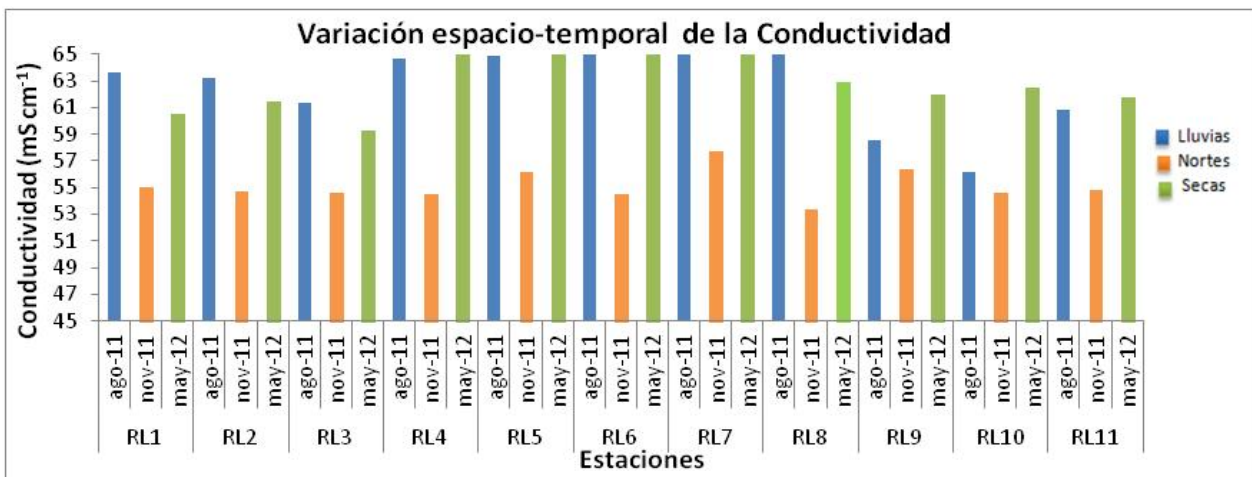


Figura 8. Variación espacio temporal de la conductividad

7.1.4 SALINIDAD

En época de Secas se registró el mayor valor de salinidad, determinada con la sonda de conductividad (HACH H40d), con un promedio de 38.05 ppt que se relaciona con el proceso de evaporación. La temporada en la que se esperaba registrar menor salinidad era la de Lluvias, por la dilución generada por el ingreso de agua pluvial, y la que presentó menor concentración de salinidad fue la temporada de Nortes, con un promedio de salinidad de 33.15 ppt, este comportamiento se debe a un rezago en el aporte de agua dulce por parte del acuífero al sistema. El acuífero se recarga en Lluvias, pero para que esta agua llegue a la zona costera pasan semanas. La salinidad presenta diferencia significativa temporal ($p < 0.05$), lo que indica la fuerte influencia del cambio de estaciones en esta variable.

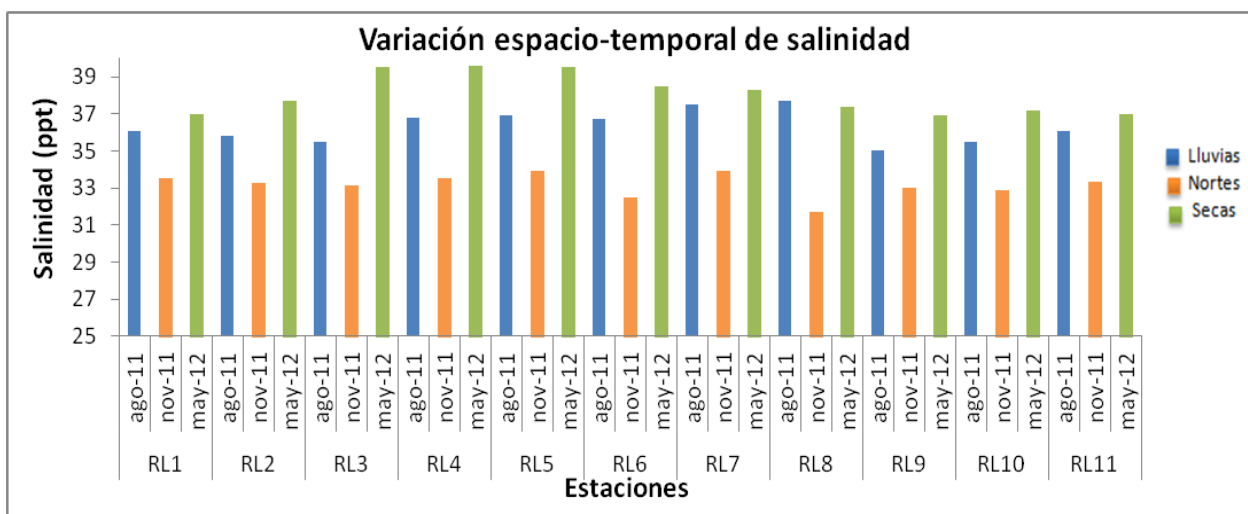


Figura 9. Variación espacio temporal de la salinidad

7.1.5 OXÍGENO DISUELTO

El oxígeno disuelto presenta diferencias temporales significativas ($p < 0.05$), siendo menor durante la época de Norte, con un promedio de 4.13 mg L^{-1} , y mayor en época de Lluvias, con un promedio de 5.81 mg L^{-1} , el oxígeno disuelto en temporada de Nortes es menor principalmente porque el mayor aporte de oxígeno al agua es a través del proceso de fotosíntesis (como resultado de la fotólisis del agua que es la ruptura de enlaces químicos por efecto de la luz) y el que los días sean nublados en dicha temporada ocasiona que disminuya el paso de la luz, disminuyendo la

producción de oxígeno. En temporada de Lluvias la concentración de oxígeno disuelto es mayor porque es la temporada con menor profundidad y la concentración de oxígeno disuelto en el agua disminuye conforme la profundidad se incrementa (Chapman y Kimstach, 1992).

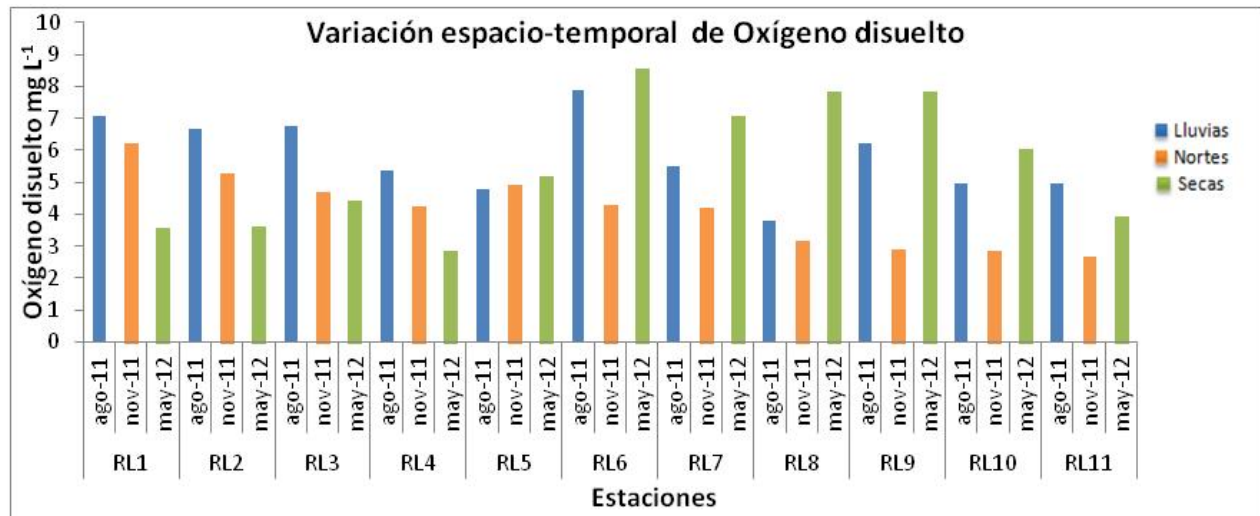


Figura 10. Variación espacio temporal de oxígeno disuelto

7.1.6 pH

El pH presenta diferencias temporales significativas ($p < 0.05$). El pH se mantiene en un intervalo entre 7.09 (dato menor) y 9.58 (dato mayor), ambos datos se consideraron de los tres muestreos, el valor promedio de pH fue de 8.28. El sistema de Ría Lagartos presenta un valor de pH básico, implicando una menor tendencia de los metales a permanecer en disolución ya que precipitarán como carbonatos e hidróxidos (Salomons y Stigliani, 1995). Se sabe que el suelo de esta zona es kárstico, ocasionando que el sistema se encuentre amortiguado por el equilibrio carbonato-bicarbonato.

Los muestreos se realizan entre 11 am y 4 pm, lo que aseguraría la regularidad de los datos. Esto porque en la mañana se presentan valores más bajos de pH, debido a la fuerte actividad fotosintética de la biota y en la noche el medio tiende a estar más alcalino (Gross, 1982).

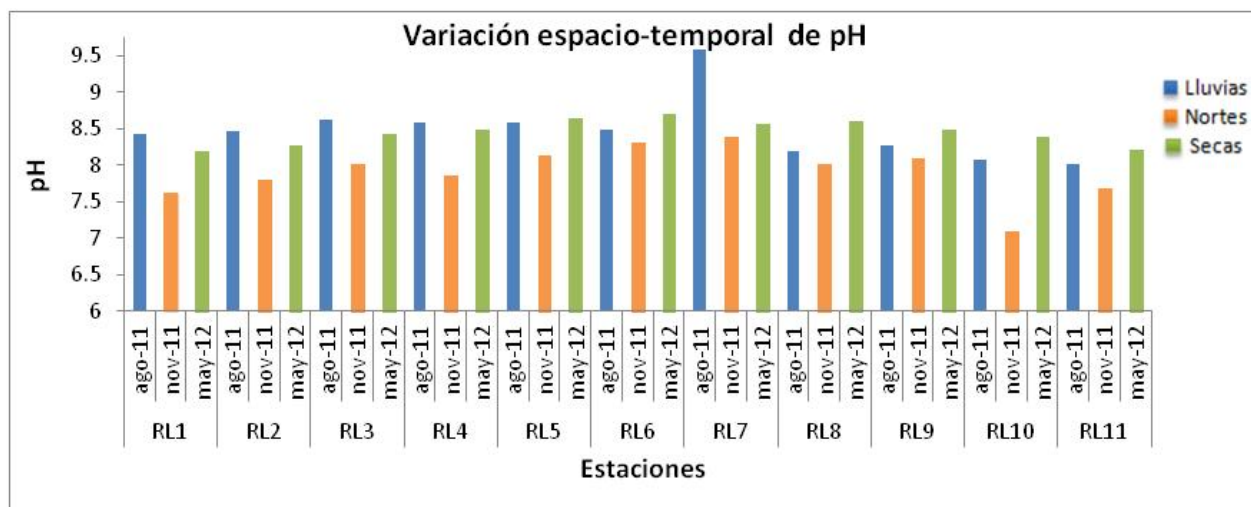


Figura 11. Variación espacio temporal de pH

7.1.7 PORCENTAJE DE MATERIAL FINO

El análisis granulométrico indica la presencia de un porcentaje mayor de material fino en la temporada de Lluvias (por la erosión pluvial que existe), seguido por Nortes y por último, Secas. Este aumento se debe principalmente a RL5 y RL6 que se encuentran en la zona con forma de meandro (cuello de cisne) donde se favorece el proceso de sedimentación. La zona se encuentra parcialmente aislada provocando que el tiempo de residencia sea mayor mientras que el tiempo de renovación del agua es más lento. En la Tabla 4 se comparan los promedios del material fino obtenidos en las tres temporadas. Los contaminantes se asocian a los sedimentos finos por lo que es la fracción granulométrica la que se tomará en cuenta para el estudio, también es posible determinar la hidrodinámica del sistema ya que mediante la presión eólica o hidráulica se remueven los sedimentos del fondo de la zona.

Tabla 4. Promedio de Material Fino

Promedio de Material Fino	
Temporada	% Material Fino (Limos y arcillas)
Lluvias	33.92
Nortes	32.64
Secas	23.22
Promedio Anual	29.93

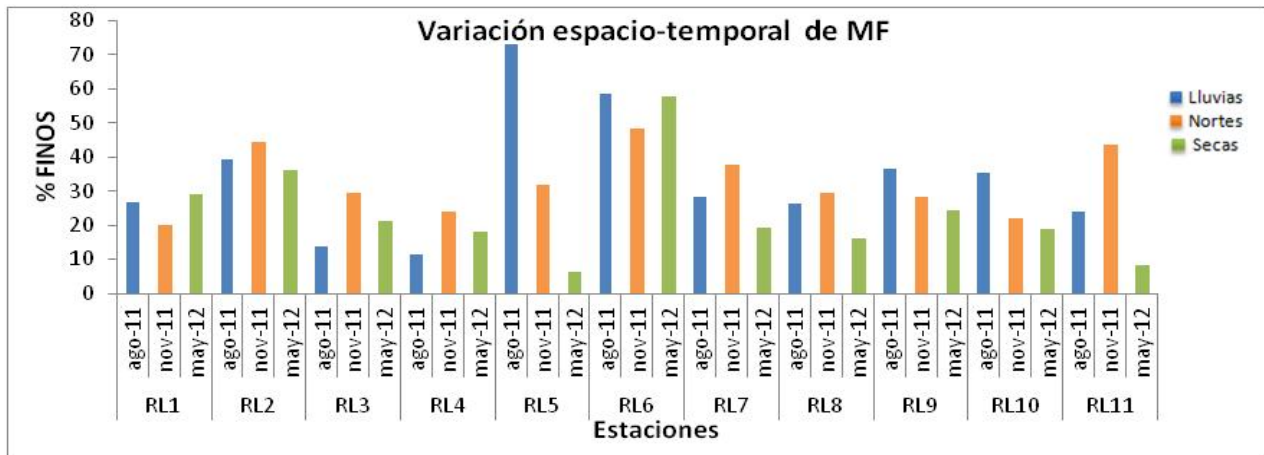


Figura 12. Variación espacio temporal del porcentaje de material fino

7.1.8 VARIACIÓN ESPACIO-TEMPORAL DE % MO

Para el porcentaje de materia orgánica, al realizar el análisis de varianza se encontró que existen diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las estaciones hidrológicas. En la estación RL7 el porcentaje de MO es 4.62%, siendo el valor más alto obtenido en el ciclo anual y perteneciente a la época de Secas. Un sistema se considera rico en materia orgánica si su contenido rebasa el 5% (el valor máximo obtenido es aproximadamente 5%). Este hecho probablemente se deba a que la estación se encuentra en la zona donde el tiempo de renovación de agua es lento por lo que permite que todo el material orgánico deposite en la zona. La temporada de Secas presentó las mayores cantidades de materia orgánica con un promedio de 2.93 % de MO a diferencia de Lluvias con 1.82 % y Nortes con 2.44% (Figura 13).

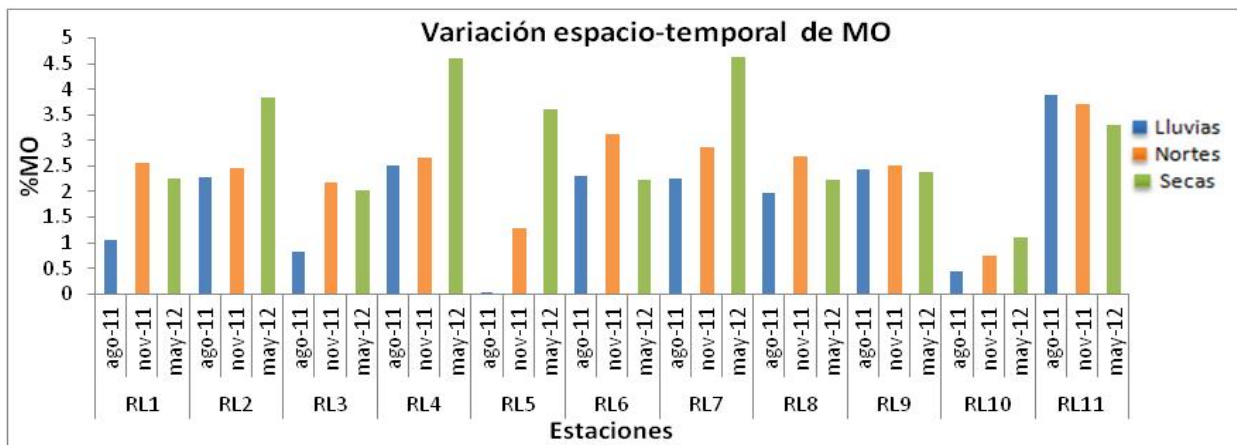


Figura 13. Variación espacio temporal del porcentaje de materia orgánica

7.2 VARIACION ESPACIO-TEMPORAL DE METALES

Las concentraciones obtenidas para Pb, Cd, As, Al, Fe, Mn, Cu, Cr, Sn y Zn no presentaron diferencias significativas en cuanto a la variación estacional, es decir, a lo largo de la laguna y tampoco presentaron variación temporal. Mientras que para la concentración de Ni si existe una diferencia significativa temporal ($p < 0.05$) pero no estacional.

7.3 DETERMINACIÓN DE DAÑO POTENCIAL

El daño potencial que pueda presentar la zona costera de Ría Lagartos a causa de la concentración de los metales se comparó con los máximos permisibles de normas internacionales. México no cuenta con normas que regulen los límites de contaminación en sedimentos costeros, por lo que se utilizaron los valores de referencia de la NOAA (Screening Quick Reference Tables, SQuiRTs National Oceanic and Atmospheric Administration) donde se muestran los valores recomendados y se indican las concentraciones esperadas del daño a la población bentónica. El nivel de efecto mínimo (TEL) se utilizó para la comparación, ya que representa el valor de concentración de una sustancia donde ya se detectan efectos ambientales (Tabla 5).

Tabla 5. Valores de referencia de la SQuiRTs NOAA para metales en sedimentos

Valores de referencia de la NOAA,2008 (Screening Quick Reference Tables, SQuiRTs National Oceanic and Atmospheric Administration)					
Unidades $\mu\text{g g}^{-1}$	TEL	ERL	PEL	ERM	AET
Aluminio	—	—	—	—	1.8%
Arsenico	7.24	8.2	41.6	70	35
Cadmio	0.67	1.2	4.21	9.6	3
Cromo	52.3	81	160.4	370	62
Cobre	18.7	34	108	270	390
Hierro	—	—	—	—	22%
Manganeso	—	—	—	—	260

Níquel	15.9	20.9	42.8	51.6	110
Plomo	30.24	46.7	112.18	218	400
Estaño	0.048	—	—	—	>3.4
Zinc	124	150	271	410	410
TEL= Nivel de Efecto mínimo ERL= Nivel de Efecto Bajos PEL= Nivel de Efecto Probable ERM = Mediana del Rango de efecto mínimo AET = Efecto mínimo evidente					

7.3.1 CONCENTRACIÓN DE PLOMO

La concentración de Pb en sedimentos no rebasa el valor recomendado por los SQuiRTs, pero algunas zonas muestran altas concentraciones, tales como: RL2, RL3 y RL11 con 10.07, 17.69 y 14.59 $\mu\text{g g}^{-1}$ respectivamente. RL2 presenta esta concentración ya que se encuentra cerca del poblado de San Felipe, viéndose afectado por la descarga de agua residuales del poblado. En temporada de Nortes y Secas no vemos este aumento en RL2 ya que en Lluvias la concentración de contaminantes aumenta debido a un crecimiento en las escorrentías.

La estación RL3 en la temporada de Secas presenta también una concentración de plomo alta a diferencia de las demás estaciones, quizás esto se deba a la morfología de la zona costera y a que este punto es una zona de depósito de sedimentos y por ende de acumulación de metales.

Por último se analizó la estación RL11, en la temporada de Nortes. Este punto es el único colocado en la zona de transición, la cual se caracteriza por la presencia de manglar a lo largo del canal. Este hecho provoca una disminución del flujo hídrico natural que ocasiona el proceso de azolvamiento y por consiguiente se favorece el proceso de sedimentación y acumulación.

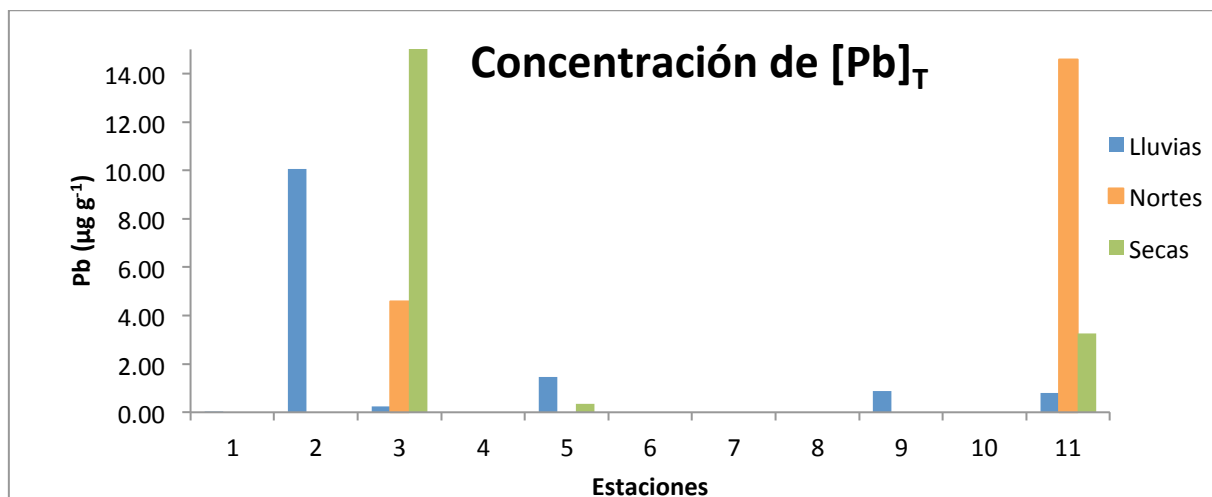


Figura 14. Concentración de Pb obtenido en sedimentos superficial en las tres épocas de un ciclo anual.

7.3.2 CONCENTRACIÓN DE CADMIO

La concentración de Cd determinado en este trabajo muestra que en las tres épocas del año hay una concentración elevada en la mayoría de los puntos de muestreo, superando el límite máximo permisible establecido por los SQiRTs ($0.67 \mu\text{g g}^{-1}$). La presencia de Cd en sedimentos es debida a un proceso de co-precipitación con el material particulado suspendido, principalmente adsorbido por la materia orgánica, con la que forma complejos (Villanueva y Vazquez, 1992). Esta laguna costera podría servir como zona de depósito de este metal. Páez-Osuna (1990) menciona que existen una asociación directa entre la concentración elevada de Cd y las descargas de aguas residuales. En Ría Lagartos dos poblados aportan descargas de aguas residuales por medio del mal manejo de desechos domésticos y por infiltraciones de las aguas negras (Figura 2).

El punto de muestreo sobresaliente es RL11, alcanzando el valor máximo ($1.85 \mu\text{g g}^{-1}$), esto se relaciona con la morfología de la zona ya que se promueve la sedimentación por disminución del flujo hídrico, debido a la presencia de manglar en esta zona. Además, en esta zona hay un tiradero clandestino que aporta Cd en forma de lixiviados (como se sabe la Península de Yucatán no presenta aporte natural de Cd por lo que la presencia de este metal es en su mayoría antropogénico (Pazos-Capeans 2007).

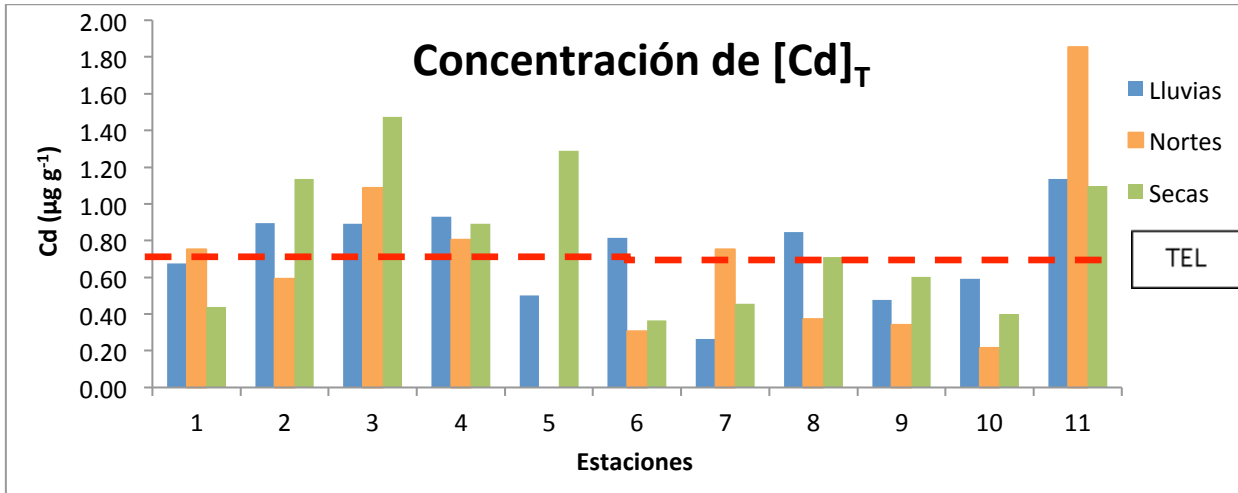


Figura 15. Concentración de Cd obtenido en sedimentos superficial en las tres épocas de un ciclo anual y el límite establecido como criterio ecológico TEL (Nivel de Efecto mínimo).

7.3.3 CONCENTRACIÓN DE ARSÉNICO

El As podría estar controlado por variaciones climáticas, cambios fisicoquímicos o aportes en el sistema. En la Figura 16 se observa que algunos puntos en diferentes épocas rebasan el nivel de efecto mínimo, sin embargo se necesitaría hacer estudios en núcleos sedimentarios o en varios años consecutivos para determinar si la contaminación por As está aumentando día con día y poder con ello tomar medidas preventivas para evitar el daño irreversible a este ecosistema.

Los puntos de muestreo que rebasan los máximos permisibles en temporada de Nortes son RL3, RL4, RL5 Y RL11, como se ha mencionado anteriormente se cree que RL3 es una zona de depósito de sedimentos por eso se obtiene una mayor concentración de As en este punto, además RL3, RL4 y RL5 se encuentran en la zona léntica por ello presentan, durante esta época, una mayor acumulación de dicho metal. Una de las causas de esta anomalía es la cercanía de estas estaciones a las zonas de los basureros informales, a los desechos domésticos y a las actividades marítimo-portuarias. RL11 está en el intervalo de efecto mínimo a la biota bentónica, probablemente porque se encuentra cerca de un tiradero clandestino, por ello podemos suponer que el aumento de As se debe a las fuentes antropogénicas. Sin embargo, es importante observar que las concentraciones de As para casi todas las estaciones de

muestreo se presentan en época de Nortes y Secas, lo que indicaría un aporte de As a través del agua del acuífero (Herrera-Silveira *et al.*, 2004).

En temporada de Secas los puntos de muestreo que rebasan los máximos permisibles son RL7, RL9 Y RL10 todos estos están situados en la zona de azolve. En esta zona se favorece el proceso de sedimentación ya que en su extremo oeste se tiene forma de meandro, además de que se encuentra parcialmente aislada evitando que el tiempo de renovación de agua sea acelerado, por eso se vuelve una zona de acumulación. RL10 también se encuentra cerca del poblado de Ría Lagartos por lo que los metales liberados hacia la laguna por esta población esta provocando el aumento de concentración.

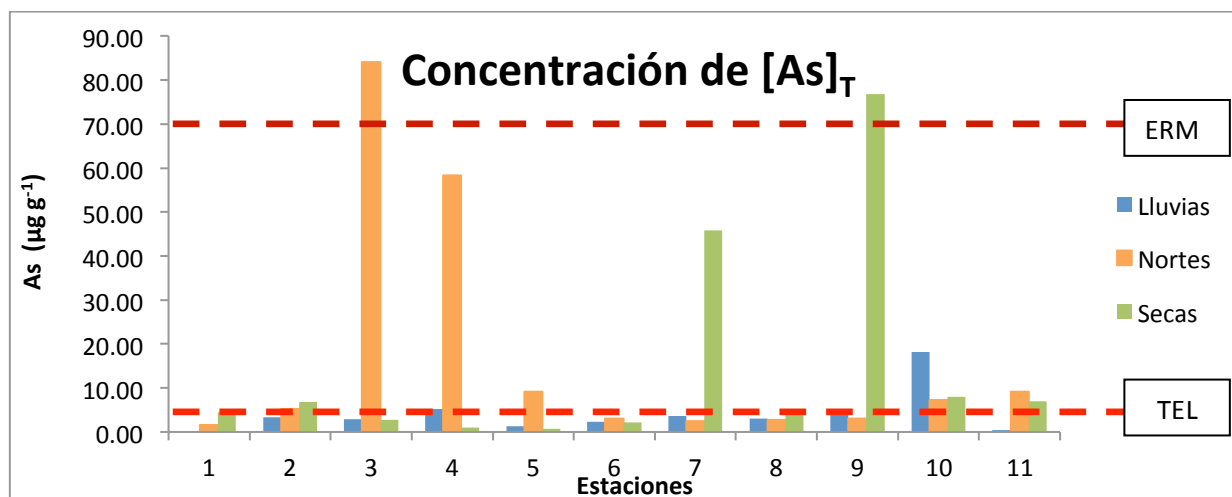


Figura 16. Concentración de As obtenido en sedimentos superficial en las tres épocas de un ciclo anua y el límite establecido como criterio ecológico TEL (Nivel de Efecto mínimo) y ERM (Mediana del Rango de efecto mínimo).

7.3.4 CONCENTRACIÓN DE HIERRO

El Fe es un elemento vital en el metabolismo de muchos organismos, dado que tiene importancia en procesos como fotosíntesis, respiración, transporte de electrones, etc. Su presencia en bajas concentraciones indica que hay una falta de actividad biológica, ya que la actividad fotosintética ocasiona que el ión ferroso se oxide ocasionando así la precipitación de este en los sedimentos (Rainbow, 2002).

La concentración promedio de Fe que se registró fue: 3.13 %, 2.96 % y 2.49 % en época de Lluvias, Nortes y Secas respectivamente. Esto podría indicar que existe un transporte, por lixiviación de las zonas aledañas o por entrada de agua del acuífero, con una depositación posterior. Sin embargo, el Fe no se considera realmente perjudicial dado que tiene función biológica. En la época de Secas podría existir un cambio en el pH del suelo debido a la gran cantidad de materia orgánica en descomposición, y al disminuir el pH algunos metales redox sensibles son desorbidos hacia la columna de agua (Jacobs y Emerson, 1982).

Los SQuiRTs indican que la concentración de Fe para un efecto mínimo en fauna bentónica es del 22%, mientras que en este estudio anual la concentración más alta obtenida en sedimentos fue de 8.28%, por lo que el Fe presente en la Ría no representa un riesgo para el ecosistema.

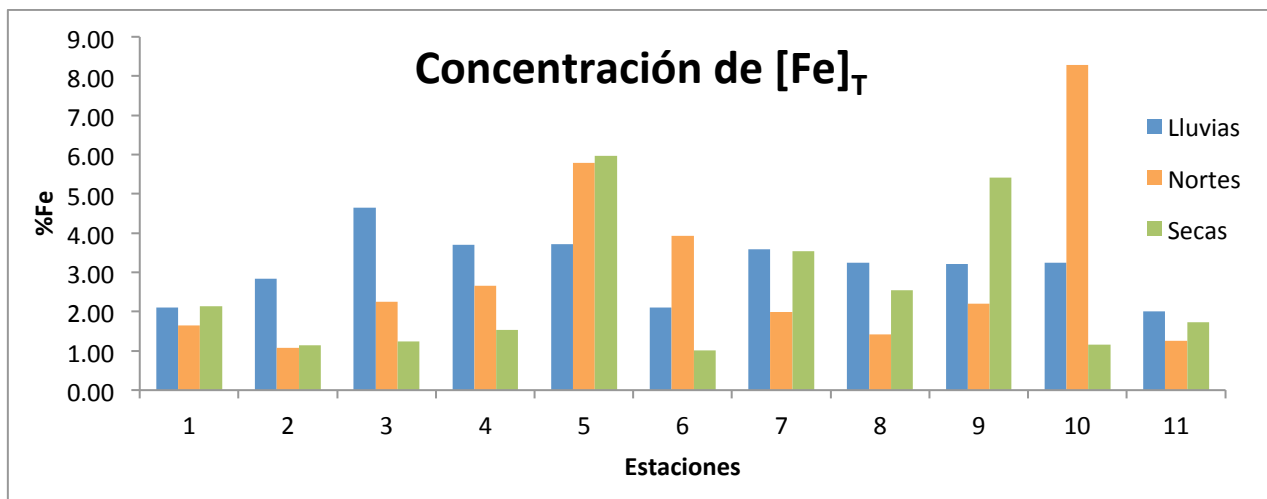


Figura 17. Concentración de Fe obtenido en sedimentos superficial en las tres épocas de un ciclo anual.

7.3.5 CONCENTRACIÓN DE MANGANESO

El Mn es un metal abundante en la corteza terrestre y en ambientes marinos y no se considera un metal altamente contaminante o tóxico, aunque se ha demostrado que algunos organismos son sensibles a este metal (Lenntech, 2011).

Los SQuiRTs (Buchmann, 2008) establecen como valor umbral $260 \mu\text{g g}^{-1}$ para afectar la biota bentónica. En ninguna temporada se rebasó el valor máximo permisible (Figura 18). El valor máximo ($89.57 \mu\text{g g}^{-1}$) se obtuvo en RL8 en temporada de Lluvias. La

causa podría deberse a la existencia de actividades marítimo-portuarias, agropecuarias y a la presencia de un tiradero. El Mn se utiliza en la producción de acero, como aditivo de la gasolina y en alimentos balanceados para ganado (Rosales-Hoz, 2003). También se observan valores altos de Mn en RL2 y RL11 principalmente porque estos dos puntos de muestreo están cerca de actividades antropogénicas como por ejemplo, tiraderos de basura.

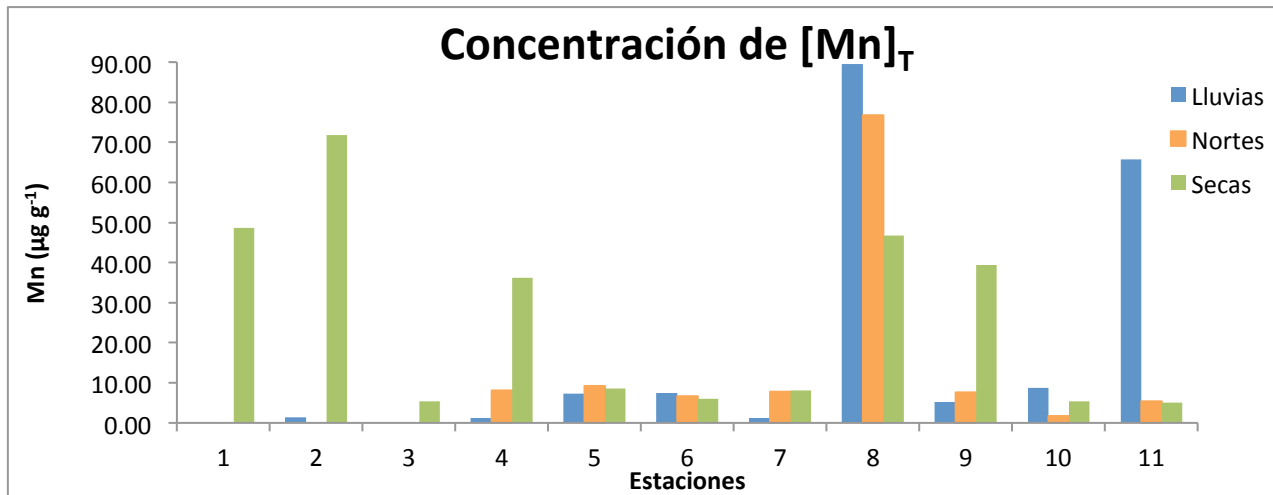


Figura 15. Concentración de Mn obtenido en sedimentos superficial en las tres épocas de un ciclo anual.

7.3.6 CONCENTRACIÓN DE ZINC

Se estima que el Zn forma parte de la corteza terrestre en un 0.0005-0.02 %. Aunque su concentración en la corteza terrestre es baja es un elemento esencial para el desarrollo de muchas clases de organismos vegetales y animales (Earnshaw, A. y Greenwood, 1984).

Los puntos que presentan una variación observable son el 1 y el 11 en temporada de Lluvias, esto se debe a que en el punto 1 se está presentando un lavado de Zn de los sedimentos ocasionado la liberación de este hacia la columna de agua, en el punto 11 se está dando la acumulación de Zn probablemente proveniente de las zonas aledañas a Ría Lagartos (el Cuyo y las Coloradas), esto se confirma ya que en la zona de Ría Lagartos no se observa una variación entre las estaciones de muestreo o periodos hidrológicos.

Ninguna temporada rebasa el nivel máximo permisible estipulado por los SQiRTs que marca una concentración mínima de $124 \mu\text{g g}^{-1}$ para observar un efecto mínimo por lo que las cantidades cuantificadas de Zn a lo largo del ciclo anual no presentan ningún riesgo ambiental.

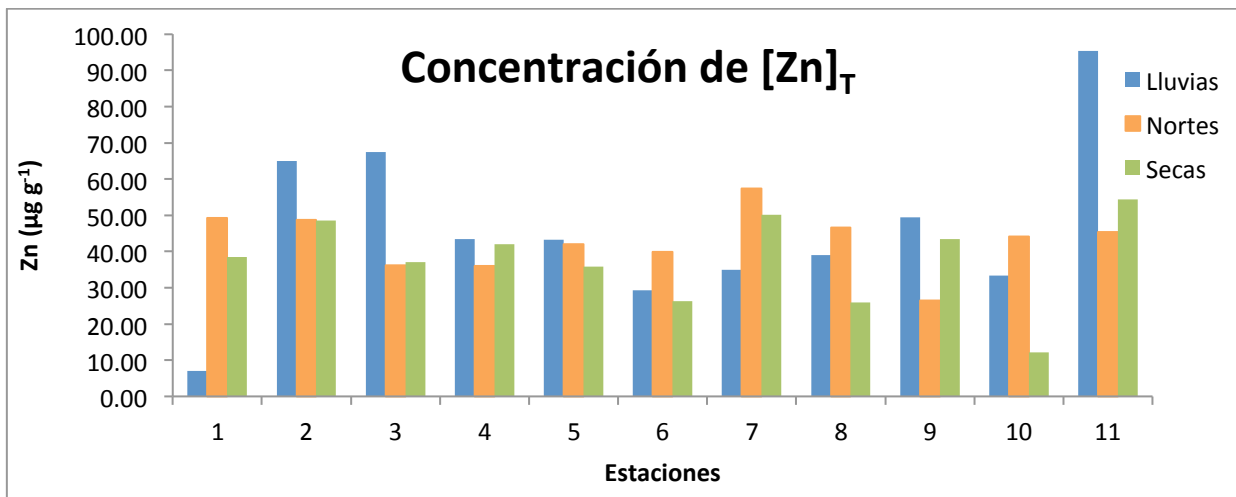


Figura 19. Concentración de Zn obtenido en sedimentos superficial en las tres épocas de un ciclo anual.

7.3.7 CONCENTRACIÓN DE COBRE

El Cu es uno de los elementos más abundantes en la corteza terrestre además de ser uno de los más utilizados. El Cu es uno de los metales esenciales para la vida de los organismos ya que forma parte de la estructura de enzimas y moléculas biológicamente importantes. Aunque forma parte de los metales esenciales llega a ser tóxico tanto en humanos como en organismos acuáticos (Harris, E.D. 1991).

Este metal se encuentra en el mar y en los sedimentos en dos estados de oxidación (Cu^+ y Cu^{2+}), influyendo en el equilibrio de los ambientes marinos, especialmente bajo fluctuaciones de las condiciones redox. La química marina del cobre afecta su bioacumulación y toxicidad; por consiguiente, al conocer el comportamiento del Cu en los ecosistemas se facilitará la comprensión y valoración de su toxicidad y acumulación en los organismos marinos. Los sedimentos se consideran un importante reservorio de cobre, un exceso de este metal en el agua de mar produce la precipitación en fase sólida de dicho metal que finalmente se deposita en los sedimentos (Sadiq, 1992).

Las concentraciones promedio fueron de $13.38 \mu\text{g g}^{-1}$, $13.36 \mu\text{g g}^{-1}$, y $23.78 \mu\text{g g}^{-1}$ para Lluvias, Nortes y Secas, respectivamente. Como se observa la mayor concentración promedio se registró en secas, seguido de Luvias y por último en Nortes. Los valores que rebasan el límite permisible por los SQuiRTs son RL7, RL8 y RL10 en Lluvias, RL1 y RL10 en Nortes y por ultimo RL5, RL9, RL10 y RL11 en Secas. Estos aumentos en las concentraciones en temporada de Lluvias y Secas se deben a la oxidación del Cu (I) a Cu (II) al reaccionar con el oxígeno disuelto, éste presenta mayor concentración en temporada de Lluvias (5.8 mg L^{-1}) seguido de Secas (5.5 mg L^{-1}). Sharman y Millera (1988) reportan que al aumentar la salinidad se ve favorecida la reacción de oxidación del Cu (I) y la laguna de Ría Lagartos muestra un ambiente muy salino. Además el pH alcalino que tiene la laguna provoca que disminuye la solubilidad del metal ocasionando que precipite como hidróxidos o carbonatos formando así parte del sedimento.

Además, Sadiq (1992) nos indica que los complejos de cloruro de Cu(I) son las formas más abundante entre pH 3.7 a 13.5 con CuCl_2^- como la forma predominante seguido CuCl_3^{2-} y CuCl . En época de Nortes RL1 presenta una concentración elevada probablemente por aporte de Cu en los sedimentos del mar adyacente y RL9 presenta esta concentración posiblemente por el aporte de desechos antropogénicas generados en el poblado de Ría Lagartos. Los resultados indican que ya se supera el límite establecido como TEL (nivel de efecto mínimo), implicando un posible riesgo para los organismos y la salud de la población.

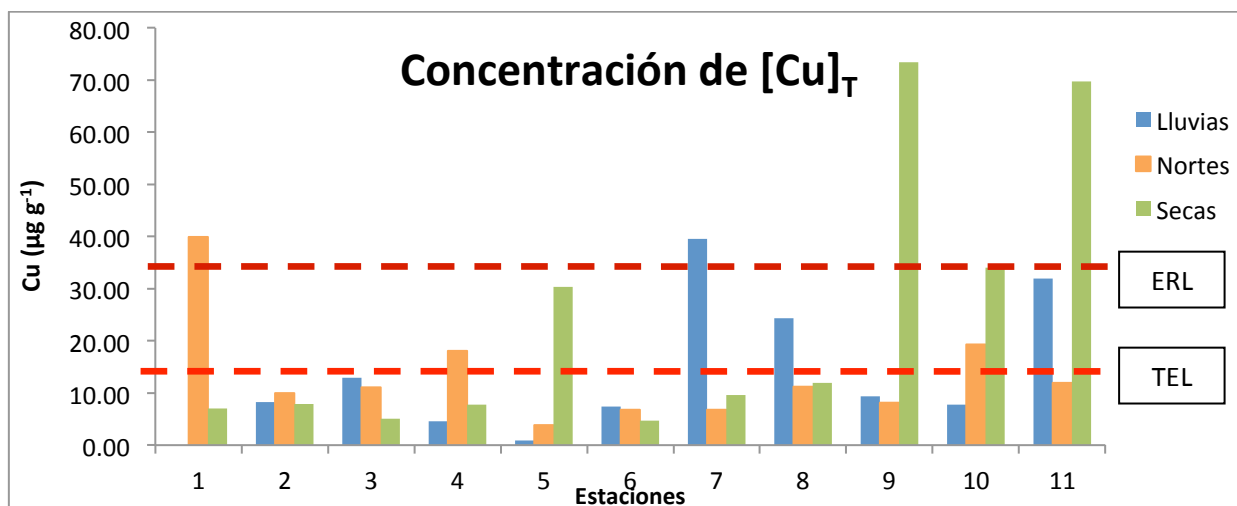


Figura 20. Concentración de Cu obtenido en sedimentos superficial en las tres épocas de un ciclo anual y el límite establecido como criterio ecológico TEL (Nivel de Efecto mínimo) y ERL (Intervalo de efecto bajo).

7.3.8 CONCENTRACIÓN DE NIQUEL

En la Figura 21 se observa que la mayoría de los puntos de muestreo en las tres temporadas rebasan los límites que recomiendan los SQuiRTs para Ni ($15.9 \mu\text{g g}^{-1}$). Los promedios para las tres épocas fueron: $22.21 \mu\text{g g}^{-1}$ (Lluvias), $14.14 \mu\text{g g}^{-1}$ (Nortes) y $29.90 \mu\text{g g}^{-1}$ (Secas). La única temporada en la que el promedio no sobrepasa el nivel establecido por los SQuiRTs es la de Nortes, tal vez se deba a que los fuertes vientos de esta temporada ocasionan una resuspensión de sedimentos finos, donde podría estar adsorbido el Ni (Loring y Rantala, 1992) y después ser transportado fuera de la Ría. En cambio en temporada de Lluvias y Secas se está presentando un efecto de acumulación de Ni en los sedimentos, probablemente relacionados con la baja de flujo, probable formación de fases sólidas orgánicas o inorgánicas de alto peso molecular que tienden a precipitar (Prosi, 1981). Las actividades antropogénicas en la zona que están aportando el Ni presente son: talleres de soldadura y la actividad marítimo-portuaria.

En Lluvias (RL11) y Secas (RL4) tuvieron una concentración de $43.90 \mu\text{g g}^{-1}$ y $46.79 \mu\text{g g}^{-1}$ respectivamente. Estos son sitios donde existe un riesgo a la biota bentónica que podría agravarse si no se toman medidas preventivas. Estos posibles aumentos se deben a que en estas zonas se obtuvieron porcentajes de MO elevados en RL11 de 3.90 % y en RL4 de 4.61 % lo que ocasiona la retención del metal por adsorción a los sitios activos de la materia orgánica sedimentaria (Salomons y Stigliani, 1995).

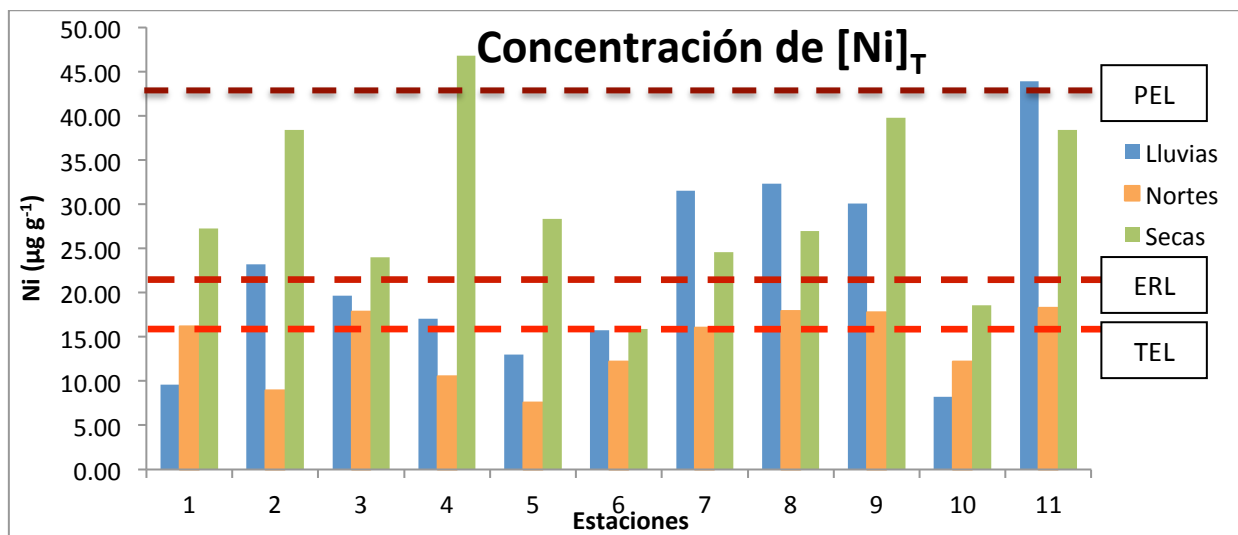


Figura 21. Concentración de Ni obtenido en sedimentos superficial en las tres épocas de un ciclo anual y el límite establecido como criterio ecológico TEL (Niveles de efecto mínimo), ERL (Intervalo de efecto bajo) y PEL (Niveles de efecto probable).

7.3.9 CONCENTRACIÓN DE CROMO

El Cr es el sexto elemento más abundante en la corteza terrestre. Presenta varios estados de oxidación que van desde 2⁻ hasta 6⁺. La forma hexavalente forma un número de oxiácidos y oxianiones incluyendo: HCrO₄⁻, Cr₂O₇²⁻ y CrO₄²⁻, siendo el último de importancia medio ambiental y toxicológica (Pazos-Capeans 2007).

En el caso de Cr se observa que todas las estaciones se encuentran por debajo del límite establecido por los SquiRTs (52.3 µg g⁻¹). En muchas estaciones no se detectó Cr en los sedimentos, indicando la presencia de este metal en forma particulada suspendida o disuelta.

El valor máximo de Cr registrado se encuentra en la época de Lluvias en la estación RL11, como se ha comentado, en esta zona se presenta un porcentaje considerable de MO y de acuerdo con Villanueva y Vázquez (1992), la concentración de Cr es directamente proporcional al contenido de MO (los compuestos de Cr (VI) en presencia de materia orgánica oxidable se reducen a compuestos de Cr (III) que son fijados al sedimento), por lo que si existe un contenido alto de MO la concentración esperada de Cr también será alta. Este aumento en la concentración de Cr se debe a que RL11 se encuentra en la zona de transición, por lo que se esta alterando los patrones de

sedimentación por el canal artificial de Ría Lagartos, provocando una disminución del flujo hídrico natural y ocasionado el proceso de azolvamiento.

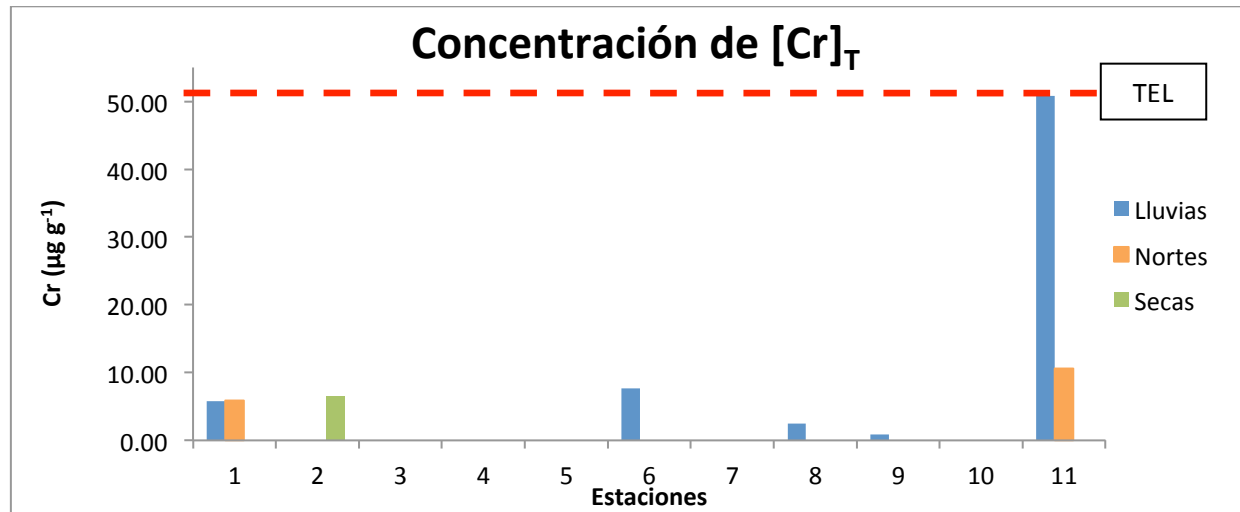


Figura 22. Concentración de Cr obtenido en sedimentos superficial en las tres épocas de un ciclo anual y el límite establecido como criterio ecológico TEL (Niveles de efecto mínimo).

7.3.10 CONCENTRACIÓN DE ESTAÑO

La Figura 23 representa los valores de Sn. Todas las estaciones se encuentran por encima del límite máximo permisible establecido por los SquiRTs, en los que se reporta el valor umbral de 0.048 µg g⁻¹. La única estación en la que no se detectó concentración de estaño es en RL1, en época de Lluvias, esto se debe a que en este punto se está presentando un lavado de Sn de los sedimentos ocasionando la liberación de este hacia la columna de agua.

Las concentraciones promedio fueron de 1.38 µg g⁻¹, 1.47 µg g⁻¹, y 1.45 µg g⁻¹ para Lluvias, Nortes y Secas. Estadísticamente las medidas son homogéneas por lo que no presenta diferencia espacial o temporal significativa. Esto indica que probablemente la geoquímica del Sn está dirigida, en magnitudes similares, por las variaciones de cada estación hidrológica y por las fuentes presentes en el sitio como son los basureros informales, desechos domésticos y actividades marítimo-portuarias.

Sin embargo, la concentración actual de Sn rebasa el nivel de efecto mínimo para la biota bentónica, por lo que la situación actual en la Ría podría generar un riesgo para los organismos en un futuro, ya que el Sn forma compuestos orgánicos como es el caso

del tributil estaño (TBT) que al ser liberado a las aguas marinas ocasiona efectos muy tóxicos a bajas concentraciones para organismos invertebrados primordialmente para crustáceos y moluscos (Newman, 2003).

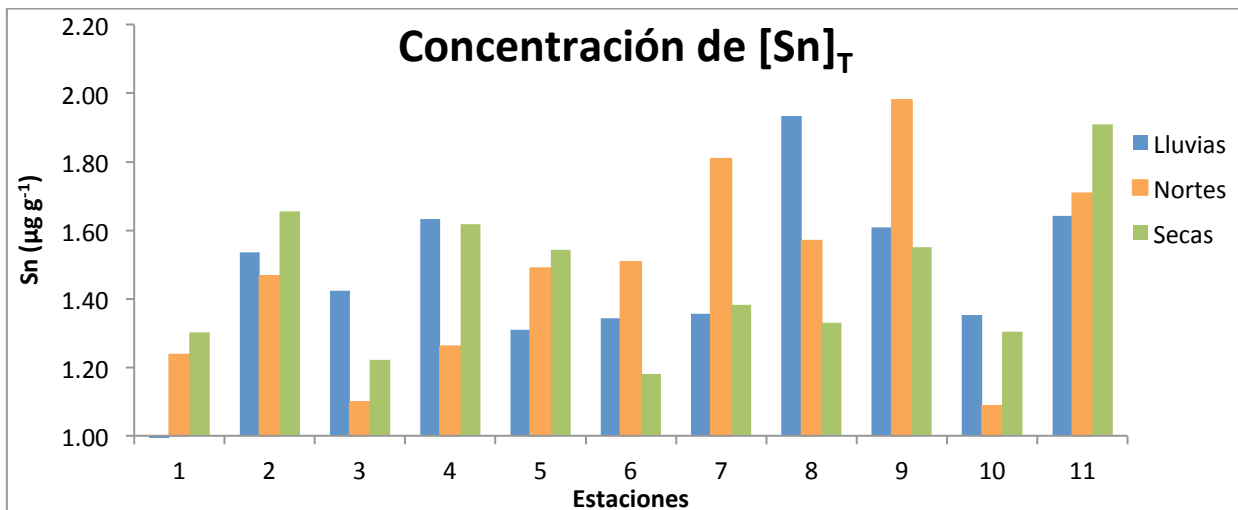


Figura 23. Concentración de Sn obtenido en sedimentos superficial en las tres épocas de un ciclo anual

7.3.11 CONCENTRACIÓN DE ALUMINIO

La NOAA marca como efecto mínimo evidente 1.8 % de concentración de Al, se observa en la Figura 24 que algunas concentraciones de Al están por encima del límite permisible solo en época de Lluvias y Nortes, lo que está indicando que está siendo aportado al sistema por lixiviación de la zona adyacente o probable transporte en el agua del acuífero con posterior deposición (Herrera-Silveira *et al.*, 2004). La disminución de Al en sedimentos en época de Secas se debe probablemente a procesos redox que favorecen la liberación del metal hacia la columna de agua (Förstner, 1987).

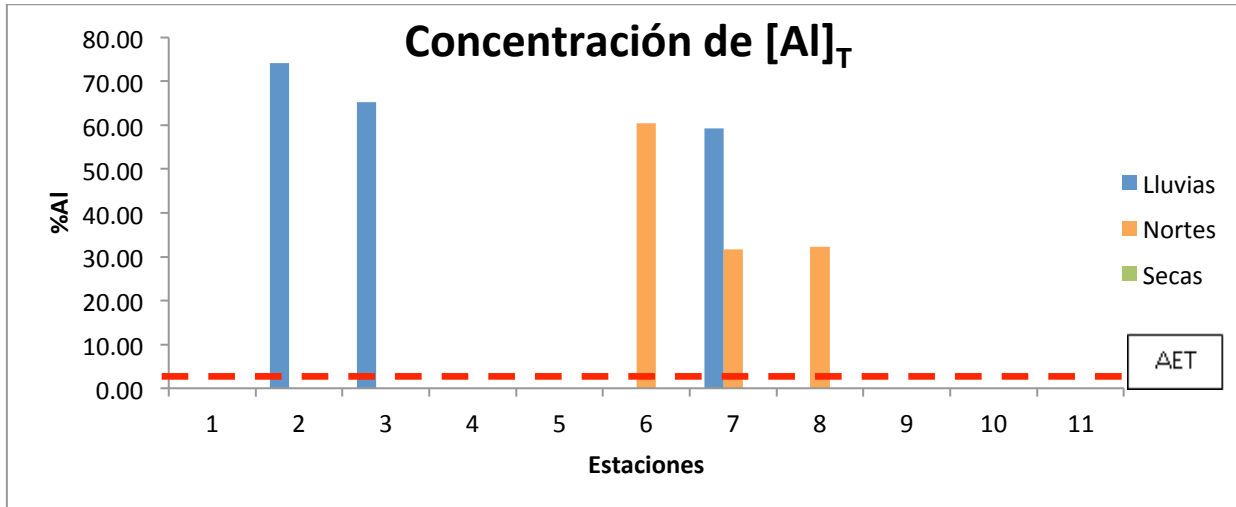


Figura 24. Concentración de Al obtenido en sedimentos superficial en las tres épocas de un ciclo anual y el límite establecido como criterio ecológico AET (Efecto mínimo evidente).

Las concentraciones que rebasan el límite permisible por los SQuiRTs son RL2, RL3, y RL7 en época de Lluvias y por ultimo RL6, RL7 y RL8 en Nortes. Estos aumentos en RL2 y RL3 se deben en parte a que se encuentran cerca del poblado de San Felipe, viéndose afectado por los contaminantes que se están generando en el poblado por lo que estos contaminantes son aportados por las industrias y por los tiraderos informales, además el mayor aporte de Al al sistema se debe principalmente por la lixiviación de las zonas aledañas o por entrada de agua del acuífero, con una posterior depositación. Los puntos RL6, RL7 y RL8 (Figura 2) se encuentran en la zona de azolve que favorece la sedimentación, su aislamiento parcial evita la renovación de agua e incrementa la concentración de Al.

7.3.12 ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN EN LA CONCENTRACIÓN DURANTE 2010 Y 2011.

La mayoría de los metales han aumentado significativamente (tabla 6) en Ría Lagartos y podría presentar un daño a la biota bentónica. Este aumento en la concentración se deben principalmente a los aportes antropogénicos que existen en la periferia de la laguna, también influidos por los cambios hidrológicos e hidrodinámicos durante los cambios de temporada (Lluvias, Nortes y Secas).

Los metales que disminuyeron su concentración tal vez estén ingresando a la columna de agua, lo que implicaría un daño a otros sistemas y por ende a la salud humana. Para corroborar lo anterior se deben de realizar otros análisis como : biodisponibilidad y concentración de metales totales en agua.

Tabla 6. Comparación de las concentraciones obtenidas en el año 2010 y 2011

Metal	Concentración (2010)	Concentración (2011)
Fe	0.65 %	0.29 %
Al	0.64 %	0.98 %
As	68.51 $\mu\text{g g}^{-1}$	11.87 $\mu\text{g g}^{-1}$
Zn	31.01 $\mu\text{g g}^{-1}$	42.22 $\mu\text{g g}^{-1}$
Mn	20.13 $\mu\text{g g}^{-1}$	17.96 $\mu\text{g g}^{-1}$
Cr	7.05 $\mu\text{g g}^{-1}$	2.75 $\mu\text{g g}^{-1}$
Cu	1.88 $\mu\text{g g}^{-1}$	16.84 $\mu\text{g g}^{-1}$
Ni	1.68 $\mu\text{g g}^{-1}$	22.08 $\mu\text{g g}^{-1}$
Pb	0.56 $\mu\text{g g}^{-1}$	1.63 $\mu\text{g g}^{-1}$
Sn	0.22 $\mu\text{g g}^{-1}$	1.43 $\mu\text{g g}^{-1}$
Cd	0.05 $\mu\text{g g}^{-1}$	0.73 $\mu\text{g g}^{-1}$

7.3.13 DIAGRAMA DE CAJAS Y BIGOTES EN TEMPORADA DE LLUVIAS

En la Figura 25 se presenta el diagrama de cajas obtenido para el arsénico, los metales y parámetros geoquímicos en temporada de Lluvias. Este tipo de graficas permiten visualizar la presencia de valores atípicos, así como realizar una primera evaluación acerca de la variabilidad de cada población. En esta gráfica ninguno de los metales y parámetros geoquímicos presentaron valores atípicos, además la mayoría de las cajas presentan una distribución asimétrica. El Al, Mn, Zn y % Finos muestran una mayor variabilidad a diferencia de Sn, Fe, Cd y %MO que presentan la menor variabilidad.

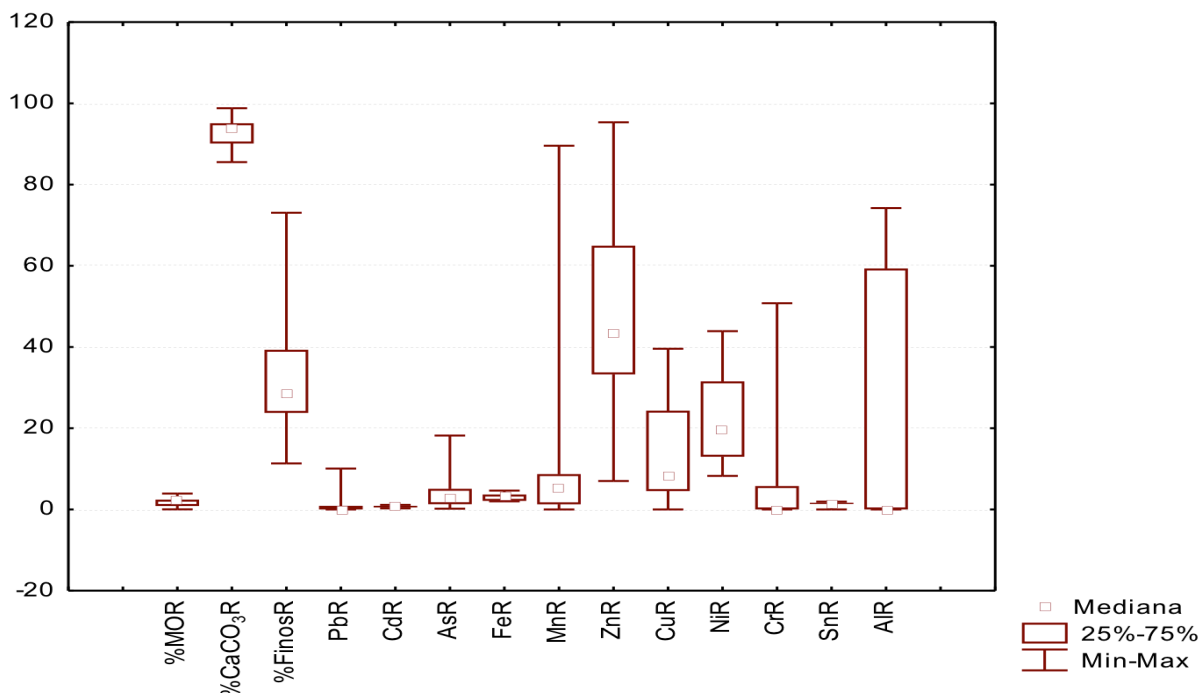


Figura 25. Diagrama de cajas para las concentraciones de Pb ($\mu\text{g g}^{-1}$), Cd ($\mu\text{g g}^{-1}$), As ($\mu\text{g g}^{-1}$), Fe (mg g^{-1}), Mn ($\mu\text{g g}^{-1}$), Zn ($\mu\text{g g}^{-1}$), Cu ($\mu\text{g g}^{-1}$), Ni ($\mu\text{g g}^{-1}$), Cr ($\mu\text{g g}^{-1}$), Sn ($\mu\text{g g}^{-1}$) y Al (mg g^{-1}), además de parámetros geoquímicos como %MO (materia orgánica), %Finos (material fino) y %CaCO₃ (carbonatos) en sedimentos en temporada de Lluvias (R) de la zona costera de Ría Lagartos.

7.3.14 DIAGRAMA DE CAJAS Y BIGOTES EN TEMPORADA DE NORTES

En la Figura 26 no existe ningún valor atípico (valor muy diferente de los demás) en el diagrama de cajas en temporada de Nortes, asimismo la mayoría de las cajas presentan una distribución asimétrica, en términos generales, debido a una mayor homogeneidad. El que exhibió mayor variabilidad fue el As, seguido de Mn y finalmente Al, asimismo los que presentaron la menor variabilidad %MO fueron Sn y Cd. Los elementos que aumentaron su variabilidad de una manera significativa, comparándolos con lo obtenido en la temporada de Lluvias, fueron As, Fe y Pb, mientras que los que disminuyeron su variabilidad fueron %Finos, Al, Mn, Zn, Cr y Ni, indicando que la acumulación de estos en los sedimentos dependen principalmente de las características geológicas de la cuenca y también se están viendo influidos por aportes naturales y antropogénicos.

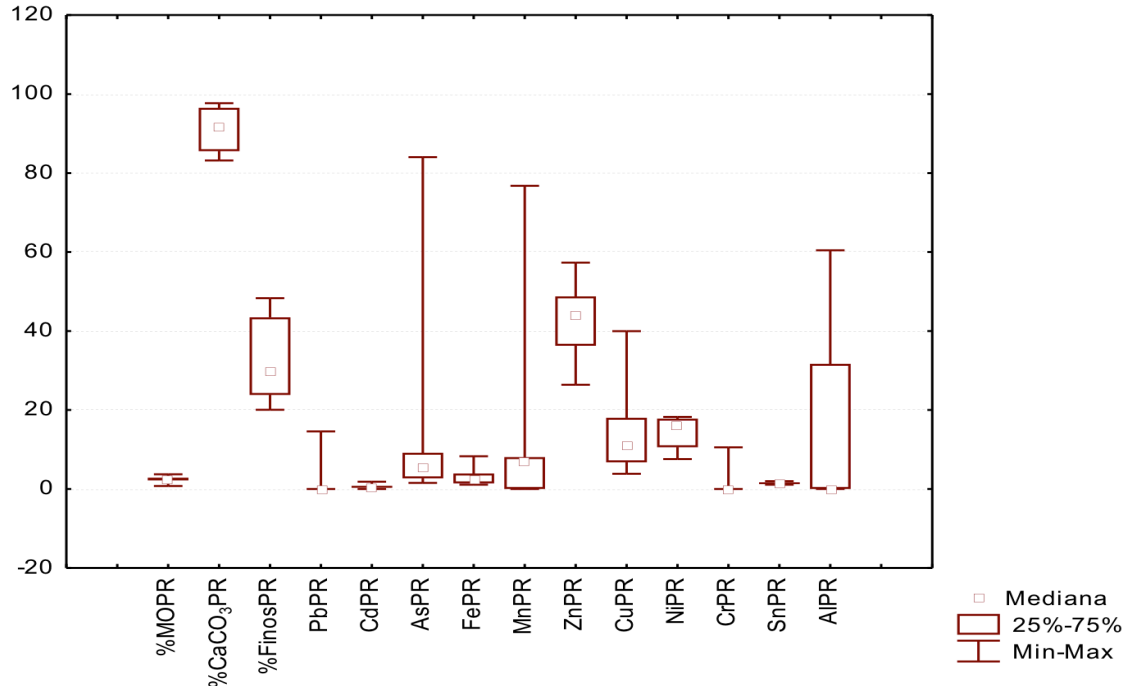


Figura 26. Diagrama de cajas para las concentraciones de Pb ($\mu\text{g g}^{-1}$), Cd ($\mu\text{g g}^{-1}$), As ($\mu\text{g g}^{-1}$), Fe (mg g^{-1}), Mn ($\mu\text{g g}^{-1}$), Zn ($\mu\text{g g}^{-1}$), Cu ($\mu\text{g g}^{-1}$), Ni ($\mu\text{g g}^{-1}$), Cr ($\mu\text{g g}^{-1}$), Sn ($\mu\text{g g}^{-1}$) y Al (mg g^{-1}), además de parámetros geoquímicos como %MO (materia orgánica), %Finos (material fino) y %CaCO₃ (carbonatos) en sedimentos en temporada de Nortes (PR) de la zona costera de Ría Lagartos.

7.3.15 DIAGRAMA DE CAJAS Y BIGOTES EN TEMPORADA DE SECAS

En la Figura 27 se presenta el diagrama de caja obtenido para los metales pesados y parámetros geoquímicos en temporada de Secas. En este diagrama no existe ningún valor atípico y presenta una distribución asimétrica. Aquí vuelve a existir un comportamiento en la dispersión de las variables similar al de Lluvias, ya que la laguna deja de ser homogénea y los sitios de acumulación promueven el incremento en la concentración de los metales, y los procesos de evaporación y muerte de organismos sésiles por condiciones extremas, producen cambios en los parámetros fisicoquímicos y geoquímicos. El As, Mn y Cu muestran la mayor variabilidad a diferencia de Al, Sn y Cd que manifiestan la menor variabilidad. Al hacer la comparación entre la temporada de Nortes y Secas el %Finos, Zn, Cu y Ni aumentaron su variabilidad a diferencia de %CaCO₃ y Al que disminuyeron su variabilidad de una manera relativamente importante.

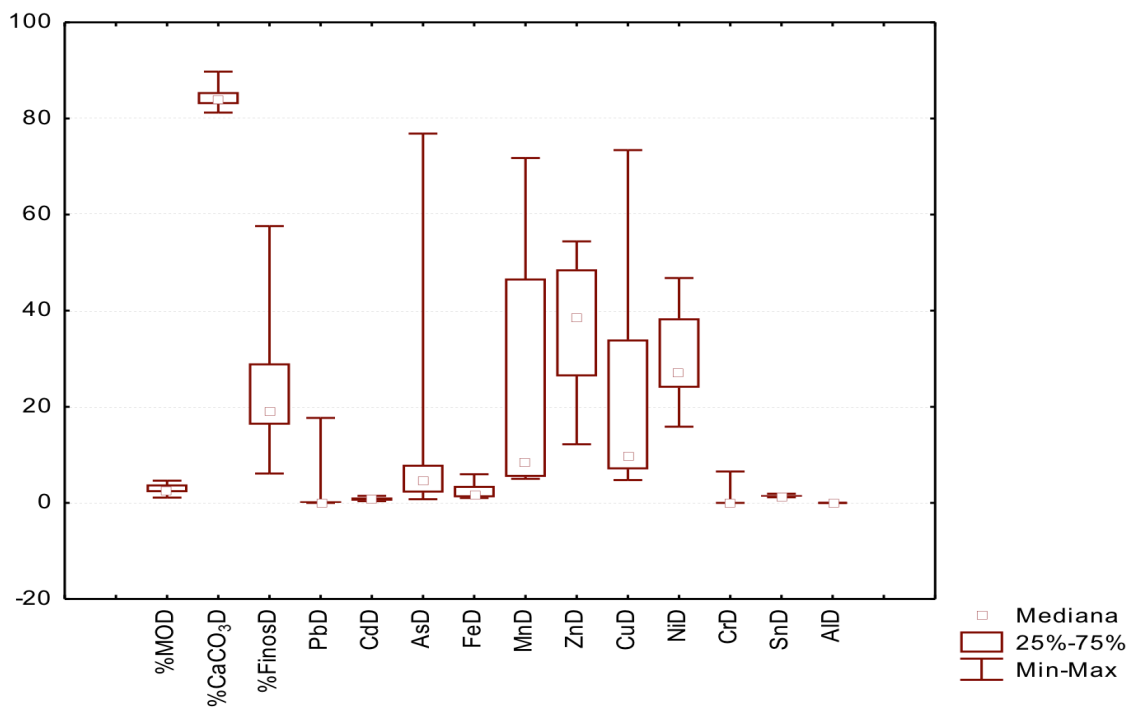


Figura 27. Diagrama de cajas para las concentraciones de Pb ($\mu\text{g g}^{-1}$), Cd ($\mu\text{g g}^{-1}$), As ($\mu\text{g g}^{-1}$), Fe (mg g^{-1}), Mn ($\mu\text{g g}^{-1}$), Zn ($\mu\text{g g}^{-1}$), Cu ($\mu\text{g g}^{-1}$), Ni ($\mu\text{g g}^{-1}$), Cr ($\mu\text{g g}^{-1}$), Sn ($\mu\text{g g}^{-1}$) y Al (mg g^{-1}), además de parámetros geoquímicos como %MO (materia orgánica), %Finos (material fino) y %CaCO₃ (carbonatos) en sedimentos en temporada de Secas (D) de la zona costera de Ría Lagartos.

7.3.16 ANÁLISIS DE AGRUPAMIENTO EN TEMPORADA DE LLUVIAS

El diagrama resultante del análisis de agrupamiento (Figura 28) entre variables permite visualizar la formación de tres grupos en la temporada de Lluvias, el primero está formado por Fe, Al, Pb y As, la relación del As y estos metales con el Al indica que muy probablemente estos metales están siendo aportados al sistema por lixiviación de la zona adyacente o por transporte en el agua del acuífero. El segundo grupo está formado por Mn, %Finos y %CaCO₃, lo que indica que probablemente el Mn está formando carbonatos insolubles que se están reteniendo en los sedimentos finos y el tercer grupo está constituido por % MO, Sn, Zn, Cd, Ni, Cu y Cr (indica que la materia orgánica esta ocasionado la retención de estos metales por adsorción en sus sitios activos formando así complejos orgánicos) (Cambell y Jessier, 1989).

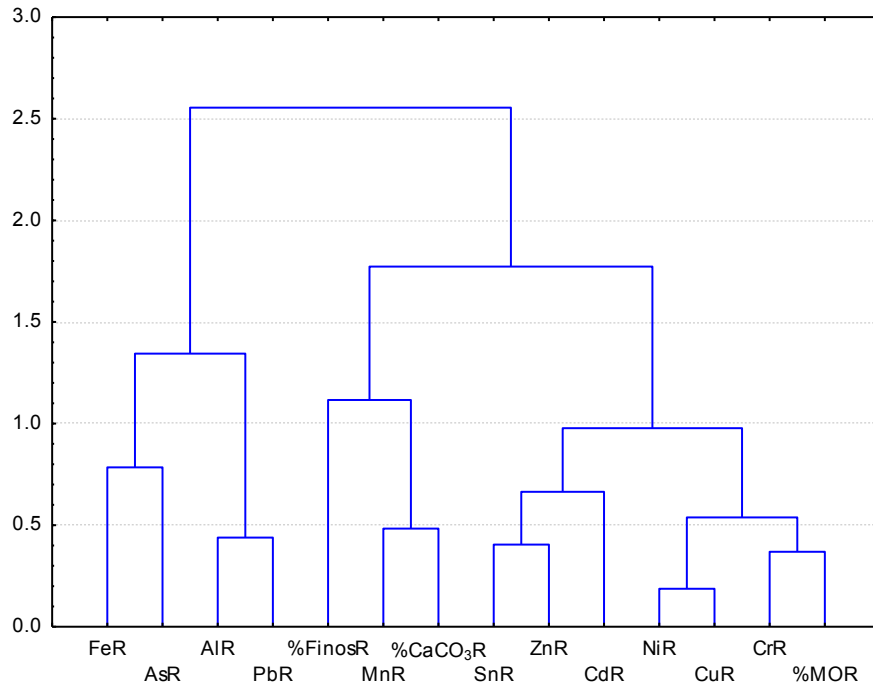


Figura 28. Diagrama resultante del análisis de agrupamiento de metales (Pd, Cd, As, Mn, Zn, Cu, Ni, Cr, Sn, Fe y Al) ($\mu\text{g g}^{-1}$) y parámetros geoquímicos (%MO, %CaCO₃ y %Finos) en sedimentos en temporada de Lluvias (R).

7.3.17 ANÁLISIS DE AGRUPAMIENTO EN TEMPORADA DE NORTES

En el diagrama (Figura 29) del análisis de agrupamiento en temporada de Nortes la distancia fenotípica es de 1. La formación de dos grupos en el primero está integrado por %CaCO₃, Cu, Zn, Fe, As, Cr, Cd, Pb y Ni en el que probablemente se están acumulando en los sedimentos por la formación de compuestos orgánicos e inorgánicos de alto peso molecular (que tienden a precipitar) y también por el aporte de las actividades antropogénicas que se desarrollan en Ría Lagartos (actividades marítimo-portuarias, agropecuarias, industriales y tiraderos de basura), el segundo grupo está compuesto por %MO, %Finos, Al, Mn y Sn con el que probablemente se explica la absorción de metales en los sedimentos por partículas de limos y arcillas ya que estos tienen una alta capacidad de absorción por las propiedades superficiales que los caracterizan y posiblemente también se esté dando la coprecipitación de estos elementos con los recubrimientos orgánicos o con la MO (Salomons y Stigliani, 1995).

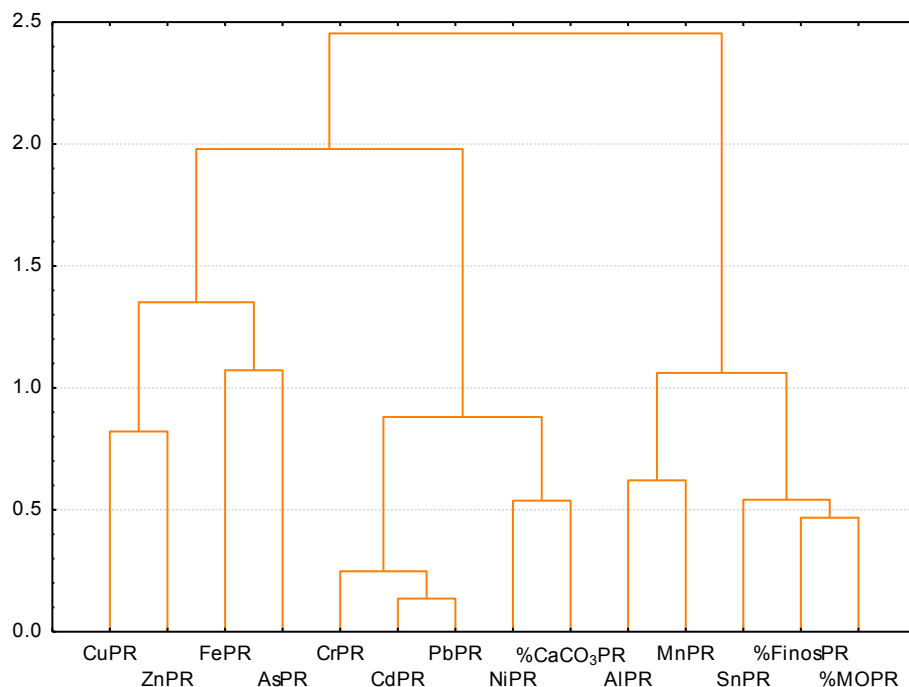


Figura 29. Diagrama resultante del análisis de agrupamiento de metales (Pd, Cd, As, Mn, Zn, Cu, Ni, Cr, Sn, Fe y Al) ($\mu\text{g g}^{-1}$) y parámetros geoquímicos (%MO, %CaCO₃ y %Finos) en sedimento en temporada de Nortes (PR).

7.3.18 ANÁLISIS DE AGRUPAMIENTO EN TEMPORADA DE SECAS

El diagrama resultante del análisis de agrupamiento en temporada de Secas que se muestra en la Figura 30. La figura nos indica que existen dos grupos el primero conformado por %CaCO₃, %Finos, Cd, Pb, Mn y Cr indica que estos metales probablemente provienen de fuentes antropogénicas ya que el Pb sirve como indicador de contaminación generada por el hombre y al estar en el mismo grupo que los demás metales se asocia que posiblemente provienen de la misma fuente antropogénica, además están formando complejos insolubles con los carbonatos que se retienen en el material fino. El segundo grupo está integrado por %MO, Cu, Fe, As, Sn, Ni y Zn donde los metales están siendo retenidos en los sedimentos por la formación de complejos orgánicos, esto es posible porque la materia orgánica es uno de los parámetros que controla la capacidad de retención de contaminantes en sedimento (Salomons y Stigliani, 1995).

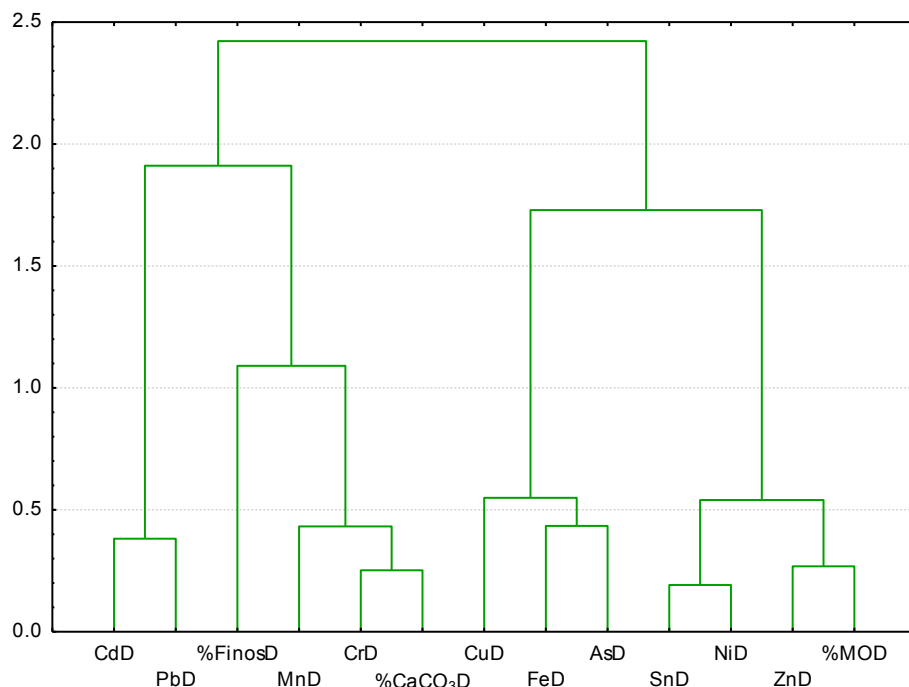


Figura 30. Diagrama resultante del análisis de agrupamiento de metales (Pd, Cd, As, Mn, Zn, Cu, Ni, Cr, Sn, Fe y Al) ($\mu\text{g g}^{-1}$) y parámetros geoquímicos (%MO, %CaCO₃ y %Finos) en sedimento en temporada de Secas (D).

7.3.19 ANÁLISIS DE AGRUPAMIENTO ESTACIONAL EN TEMPORADA DE LLUVIAS

En el diagrama (Figura 31) se existen cuatro agrupamientos. El primero nos indica que RL7, RL9 y RL10 están probablemente asociados porque se encuentran en la zona de azolve (donde se favorece el proceso de sedimentación), ya que en su extremo oeste se tiene forma de meandro (cuello de cisne), además de que se encuentra parcialmente aislado evitando que el tiempo de renovación de agua sea acelerado. El segundo grupo está conformado por RL4, RL8 y RL10. Estos puntos de muestreo se encuentran relacionados porque los metales están ingresando a la laguna costera. En esta época, por el fenómeno conocido como escorrentía y al estar cerca del meandro, se disminuye el flujo hídrico provocando así que se vuelva una zona de azolve. El tercer grupo es RL2 y RL3, que pertenecen a la misma zona cuya asociación se debe principalmente a que los metales ingresan de manera antropogénica (las estaciones se encuentran cerca del poblado de San Felipe). El cuarto agrupamiento está conformado por RL1, RL5, RL6 y RL11, las zonas donde

están se caracterizan por entradas de agua oceánica por lo que es de esperarse que estas estaciones de muestreo se vean influenciadas por los metales que estén ingresando al sistema por lixiviación o que provienen de la fracción litogénica.

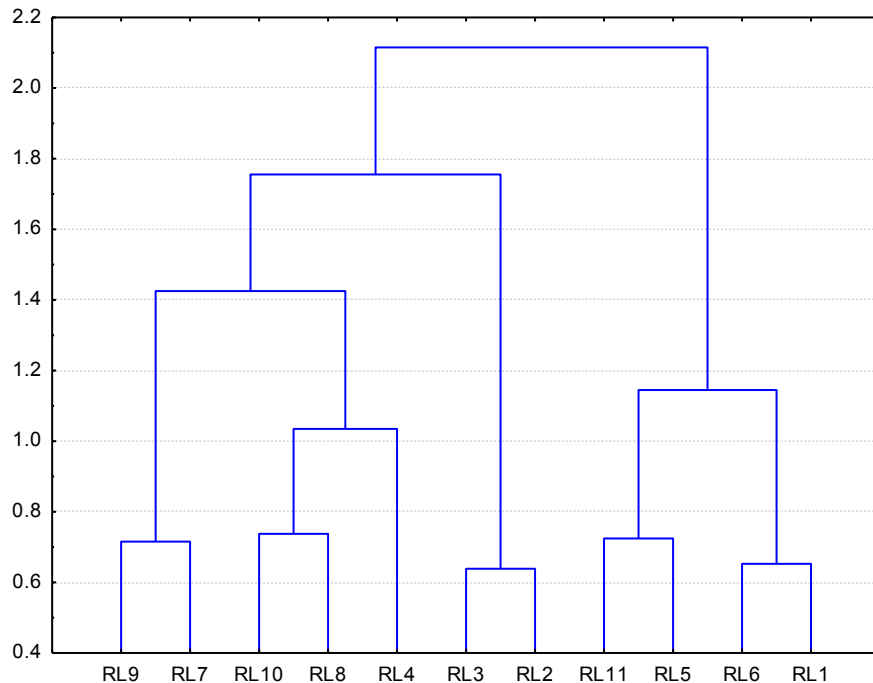


Figura 31. Diagrama resultante del análisis de agrupamiento de metales (Pd, Cd, As, Mn, Zn, Cu, Ni, Cr, Sn, Fe y Al) ($\mu\text{g g}^{-1}$) y parámetros geoquímicos (%MO, %CaCO₃ y %Finos) en sedimento por estaciones en temporada de Lluvias.

7.3.20 ANÁLISIS DE AGRUPAMIENTO ESTACIONAL EN TEMPORADA DE NORTES

En la Figura 32 el primer agrupamiento esta dado por RL6, RL7, RL8 y RL9. Los puntos de muestreo se encuentran en la zona de azolve, indicando que los metales están siendo principalmente retenidos por la geomorfología de la zona, cuyo parcial aislamiento y el tiempo de residencia provocan que se favorezca la sedimentación. El otro agrupamiento esta dado por RL2 y RL10, que son los más cercanos a los poblados, por lo que el aporte de los metales está siendo generado por fuentes antropogénicas. El último agrupamiento es RL1, RL3, RL4, RL5 y RL11. Las estaciones de muestreo RL1-RL5 pertenecen a la zona léntica y RL11 a la zona de transición. Ambas zonas se caracterizan por la interacción continua entre el agua de

la laguna y el ambiente marino. El aporte de metales está siendo hecho por la entrada del agua del acuífero.

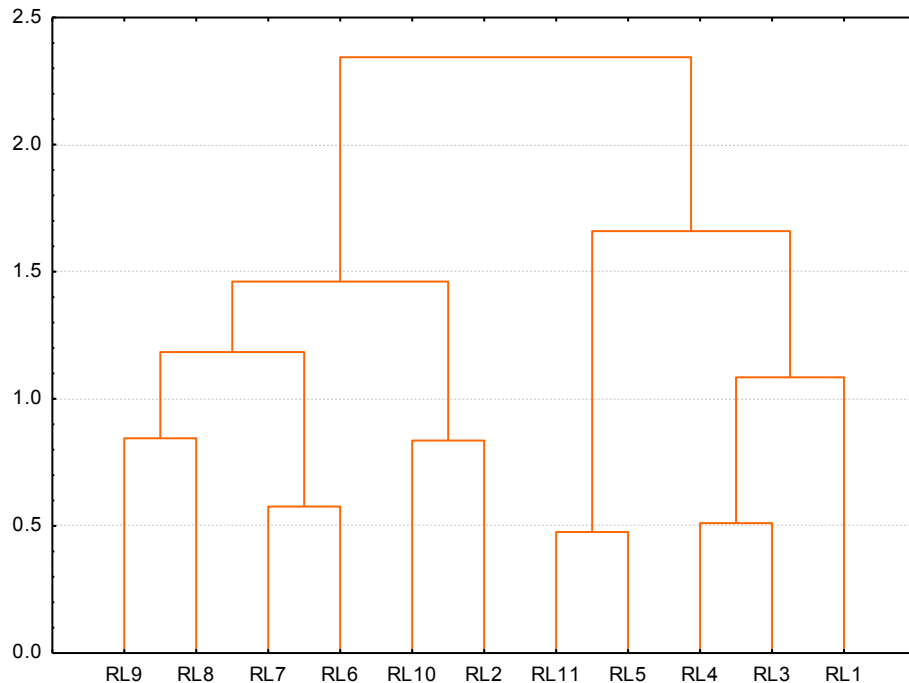


Figura 32. Diagrama resultante del análisis de agrupamiento de metales (Pd, Cd, As, Mn, Zn, Cu, Ni, Cr, Sn, Fe y Al) ($\mu\text{g g}^{-1}$) y parámetros geoquímicos (%MO, %CaCO₃ y %Finos) en sedimento por estaciones en temporada de Nortes.

7.3.21 ANÁLISIS DE AGRUPAMIENTO ESTACIONAL EN TEMPORADA DE SECAS

En la Figura 33 se muestra que el primer agrupamiento está conformado por RL5, RL7, RL9 Y RL10 estos pertenece a la sección donde se interrumpe el empuje hidráulico natural de la laguna, ocasionando un proceso de azolvamiento. Este proceso, aunado a la geomorfología del extremo oeste de la zona se favorece el proceso de sedimentación. El segundo agrupamiento esta dado por RL3, RL6 y RL11 estos puntos de muestreo posiblemente están influenciados por fuentes antropogénicas ya que cerca de estos puntos hay tiraderos de basura y actividades agropecuarias que están aportando concentración de metales. El último agrupamiento está conformado por RL1, RL2, RL4 y RL8 estos probablemente están dirigidos por la hidrodinámica y además de que estas estaciones de muestreo se ven

más influenciadas por los posibles metales que estén ingresando a través de procesos como la lixiviación.

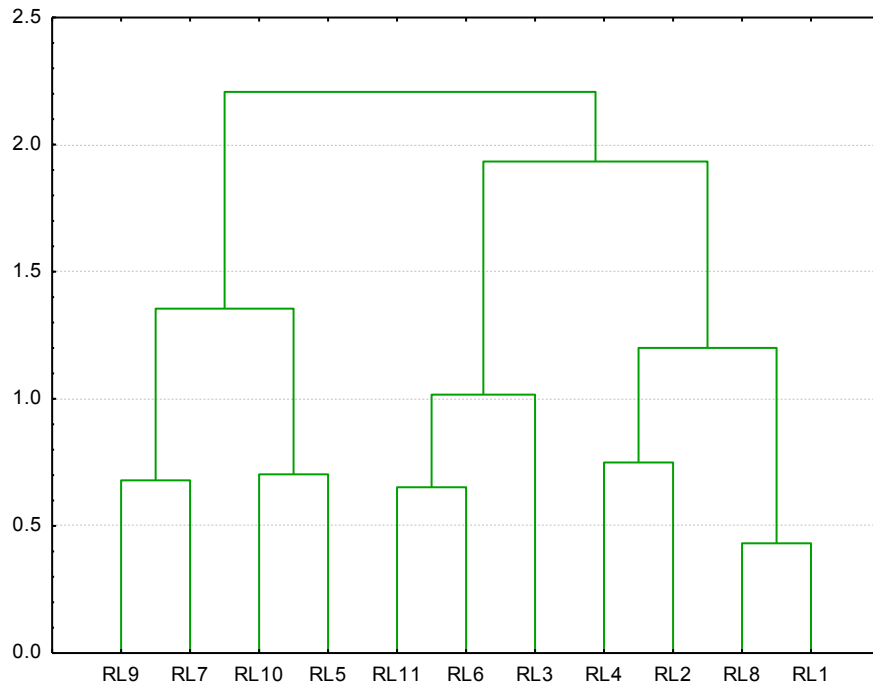


Figura 33. Diagrama resultante del análisis de agrupamiento de metales (Pd, Cd, As, Mn, Zn, Cu, Ni, Cr, Sn, Fe y Al) ($\mu\text{g g}^{-1}$) y parámetros geoquímicos (%MO, %CaCO₃ y %Finos) en sedimento por estaciones en temporada de Secas.

7.3.22 ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES EN TEMPORADA DE LLUVIAS

En el análisis de componentes principales lo primero que destaca son los vectores de los metales Zn, Ni, Cd, Sn, Cu, Cr, Mn y MO (Figura 34), que indican que estos metales se adsorben en la materia orgánica. El vector de As se correlaciona con el material fino, lo que indica que probablemente el As está siendo depositado junto con el material fino en esta época. Por otro lado tenemos al Al y Pb que estarían ingresando a la laguna costera en esta época por la entrada acuática del acuífero o por el fenómeno conocido como escorrentía. El Fe muestra que tal vez está siendo aportado al sistema por lixiviación de la zona adyacente o probablemente provenga de la fracción litogénica.

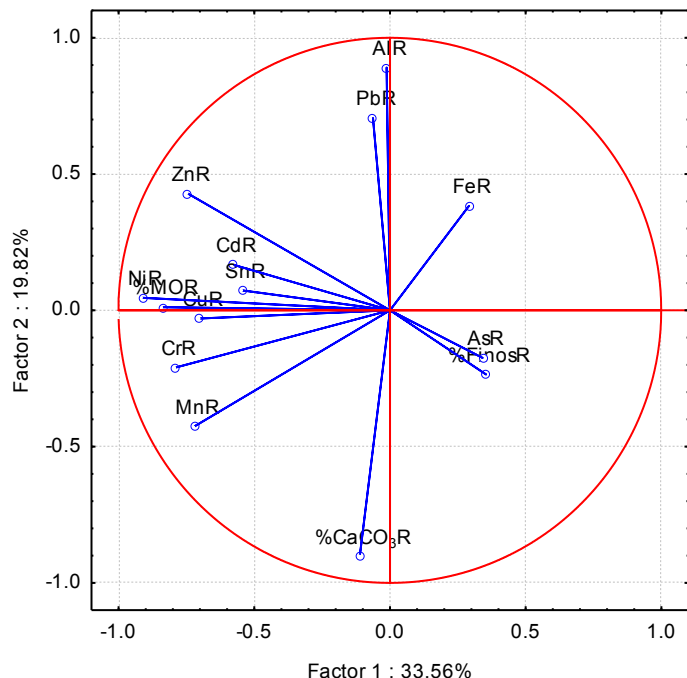


Figura 34. Análisis de componentes principales de metales (Pd, Cd, As, Mn, Zn, Cu, Ni, Cr, Sn, Fe y Al) ($\mu\text{g g}^{-1}$) y parámetros geoquímicos (%MO, %CaCO₃ y %Finos) en sedimento en temporada de Lluvias.

7.3.23 ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES EN TEMPORADA DE NORTES

En el análisis de componentes principales (Figura 35) en temporada de Nortes los metales como Cd, Cr, Pb y Ni precipitan como carbonatos y quedan suspendidos en los sedimentos. Por otra parte el Sn está asociado al material fino por lo que se piensa que este metal está siendo absorbido a los sedimentos por partículas de limos y arcillas. También el Al y Mn se encuentran correlacionados de igual manera que Cu y As por lo tanto es probable que el ingreso de estos metales sea por fuentes antropogénicas. El Fe no se encuentra relacionado con ninguna otra variable por lo que su presencia en los sedimentos se debe a que existe un transporte, por lixiviación de las zonas aledañas o por entrada de agua del acuífero, con una posterior depositación.

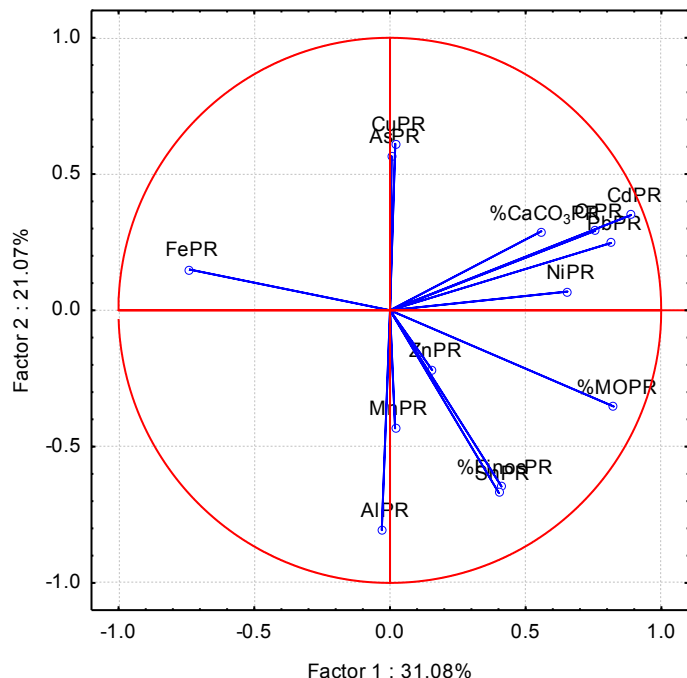


Figura 35. Análisis de componentes principales de metales (Pd, Cd, As, Mn, Zn, Cu, Ni, Cr, Sn, Fe y Al) ($\mu\text{g g}^{-1}$) y parámetros geoquímicos (%MO, %CaCO₃ y %Finos) en sedimento en temporada de Nortes.

7.3.24 ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES EN TEMPORADA DE SECAS

En el análisis de componentes principales en temporada de Secas (Figura 36) los metales como Sn, Zn y Ni presentan una afinidad con la materia orgánica con la que posiblemente forman complejos que se retienen en los sedimentos. Por otro lado también el Cd, Mn y Cr están formando complejos de carbonatos, además cabe la posibilidad de que estos metales estén siendo aportados en forma de lixiviado. También el Pb presenta una correlación baja con el material fino, que ocasiona que solo una parte de éste sea retenido en el material fino y que su presencia en la laguna costera sea de origen antropogénico. Por último se aprecia que los metales As, Fe y Cu quedan retenidos en los sedimentos por la formación de complejos con compuestos orgánicos e inorgánicos (Tebbutt et al., 1999).

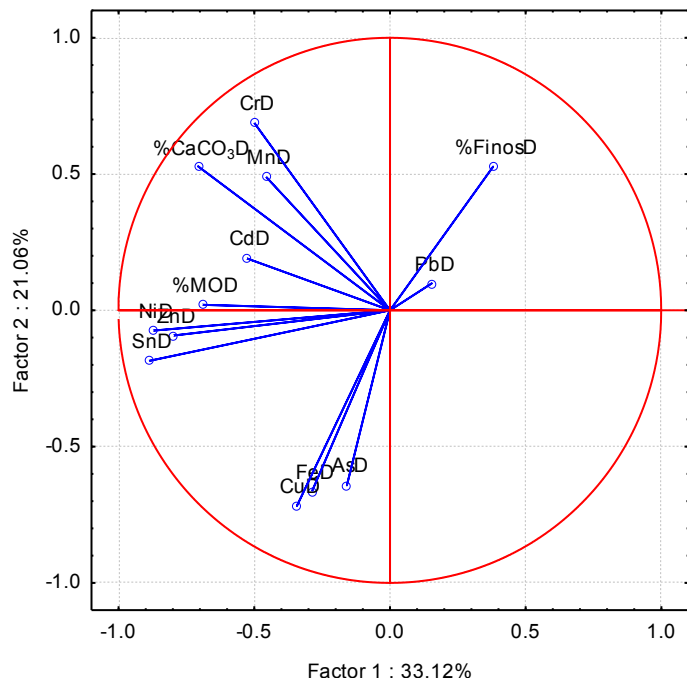


Figura 36. Análisis de componentes principales de metales (Pd, Cd, As, Mn, Zn, Cu, Ni, Cr, Sn, Fe y Al) ($\mu\text{g g}^{-1}$) y parámetros geoquímicos (%MO, %CaCO₃ y %Finos) en sedimento en temporada de Secas.

7.3.25 ANÁLISIS DE FACTORES PARA TEMPORADA DE LLUVIAS

La tabla 7 presenta los factores extraídos (cada factor es una combinación lineal de variables). El número de factores extraídos son 4. El factor 1, explica el 0.19% de la variabilidad total y presenta al Sn y Zn, lo que indica que los parámetros geoquímicos no están dirigiendo las variaciones espacio-temporales de estos metales, sino probablemente sean dirigidas por la hidrodinámica y época estacional. El factor 2, explica el 0.20% de la variabilidad total y relaciona inversa y significativamente la fracción carbonatada con él Al y Pb. Esto está indicando un proceso de dilución de la concentración de los metales por los carbonatos (Loring y Rantala, 1992), lo que es de esperarse debido a la preferencia de estos metales por los sustratos orgánicos. El factor 3 explica el 0.22% de la variabilidad total y muestra una relación significativa y directa ente Cr, Cd y la materia orgánica, e inversa con el Fe. Esto indicaría que el Cr y Cd forman complejos orgánicos a diferencia del Fe, que está entrando posiblemente por la lixiviación de las zonas aledañas o por entrada de agua del acuífero. El factor 4, explica un 0.16% de la variabilidad total y muestra al Ni y Cu

relacionados inversamente con el grano fino. Esto indicaría que estos metales formarían complejos clorados, sulfatados y orgánicos, pero sin tener una relación con la fracción mineral arcillosa.

Tabla 7. Análisis de factores para metales (Pd, Cd, As, Mn, Zn, Cu, Ni, Cr, Sn, Fe y Al) ($\mu\text{g g}^{-1}$) y parámetros geoquímicos (%MO, %CaCO₃ y %Finos) de sedimento en temporada de Lluvias (Los números en rojo representan las variables que poseen mayor peso en cada factor).

Variables	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4
%MOR	0.37	0.01	0.64	0.45
CaCO ₃ R	0.20	0.95	-0.09	-0.04
%FinosR	0.01	0.14	-0.03	-0.70
PbR	0.29	-0.75	0.14	-0.31
CdR	0.37	-0.22	0.63	-0.04
AsR	0.17	0.24	-0.56	-0.23
MnR	0.53	0.48	0.41	0.23
ZnR	0.73	-0.36	0.33	0.23
CuR	0.37	0.18	0.11	0.80
NiR	0.56	0.06	0.41	0.64
CrR	0.27	0.17	0.82	0.23
SnR	0.94	0.08	-0.16	0.13
FeR	0.20	-0.23	-0.82	0.21
AlR	0.09	-0.81	-0.28	0.36
Expl.Var	2.70	2.75	3.04	2.25
Prp.Totl	0.19	0.20	0.22	0.16

7.3.26 ANÁLISIS DE FACTORES PARA TEMPORADA DE NORTES

La tabla 8 presenta los factores extraídos. El número de factores extraídos son 3. El factor 1, explica el 0.29% de la variabilidad total y relaciona de forma directa al Cr, Cd, Pb y la materia orgánica del suelo. Esto podría indicar que estos metales en la temporada de Nortes están formando complejos con la materia orgánica reteniendo así a estos metales en los sedimentos. El factor 2, explica el 0.18% de la variabilidad total y relaciona estrechamente al Cu de forma inversa con el material fino, y al Sn de forma directa con el material fino, por lo considera que el Sn, a diferencia del Cu, sí se encuentra adsorbido la fracción mineral de arcilla del sedimento. En cambio el Cu probablemente este formando complejos inorgánicos con las sales presentes; además, Sadiq (1992) indica que los aportes de este metal son principalmente antropogénicos. El factor 3, explica el 0.13% de la variabilidad total relacionando de forma inversa al Zn con el As, este factor no tiene una explicación directa, pero probablemente esté relacionado con el incremento del As en esta época por aporte del acuífero (fuente alóctona), mientras que para el Zn la principal fuente es autóctona relacionada con las descargas urbanas. Esto se apoya en la relación directa y alta del Zn con Al e inversa y alta con el As, ya que el aluminio es un trazador natural.

Tabla 8. Análisis de factores para metales (Pd, Cd, As, Mn, Zn, Cu, Ni, Cr, Sn, Fe y Al) ($\mu\text{g g}^{-1}$) y parámetros geoquímicos (%MO, %CaCO₃ y %Finos) de sedimento en temporada de Nortes (Los números en rojo representan las variables que poseen mayor peso en cada factor)

Variables	Factor 1	Factor 2	Factor 3
%MOPR	0.65	-0.41	0.22
%CaCO ₃ PR	0.59	0.00	-0.37
%FinosPR	0.27	-0.87	0.25
PbPR	0.89	-0.14	-0.08
CdPR	0.96	0.02	-0.07
AsPR	0.15	0.20	-0.76

MnPR	-0.24	-0.06	0.09
ZnPR	0.13	0.06	0.76
CuPR	0.18	0.88	0.29
NiPR	0.53	0.12	-0.12
CrPR	0.85	0.19	0.34
SnPR	0.15	-0.65	0.16
FePR	-0.59	0.17	-0.01
AlPR	-0.29	-0.53	0.43
Expl.Var	4.13	2.55	1.86
Prp.Totl	0.29	0.18	0.13

7.3.27 ANÁLISIS DE FACTORES PARA TEMPORADA DE SECAS

En la tabla 9 se presentan los factores extraídos para época de Secas. El número de factores extraídos son 3. El factor 1, explica el 0.22% de la variabilidad total y relaciona de forma directa al Cr y Mn con la fracción carbonatada. Es probable que estos metales formen complejos insolubles con los carbonatos que se retienen en los sedimentos (Sadiq, 1992). El factor 2, explica el 0.16% de la variabilidad total y relaciona al Pb con el Cd de forma directa. González y Ramírez (1995) señalan que el Cd junto con el Pb son buenos indicadores de contaminación generada por el hombre, lo que significa que estos metales están ingresando a la laguna por fuentes antropogénicas. El factor 3, que explica el 0.20% de la variabilidad total y relaciona al Zn y Ni con la materia orgánica. Es probable que estos metales están siendo retenidos en los sedimentos por la formación de complejos orgánicos (Salomons y Stigliani, 1995).

Tabla 9. Análisis de factores para metales (Pd, Cd, As, Mn, Zn, Cu, Ni, Cr, Sn y Fe) ($\mu\text{g g}^{-1}$) y parámetros geoquímicos (%MO, %CaCO₃ y %Finos) en sedimento de Ría Lagartos en temporada de Secas (Los números en rojo representan las variables que poseen mayor peso en cada factor).

Variables	Factor 1	Factor 2	Factor 3
%MOD	0.12	-0.03	0.95
%CaCO ₃ D	0.87	0.29	0.20
%FinosD	0.17	-0.41	-0.21
PbD	-0.29	0.78	-0.05
CdD	0.26	0.86	0.27
AsD	-0.22	-0.59	0.23
MnD	0.80	-0.31	0.12
ZnD	0.20	0.08	0.86
CuD	0.00	-0.08	-0.07
NiD	0.48	0.03	0.60
CrD	0.84	0.02	0.18
SnD	0.45	0.15	0.52
FeD	-0.17	-0.24	0.20
Expl.Var	2.85	2.13	2.57
Prp.Totl	0.22	0.16	0.20

8. CONCLUSIONES

- Los parámetros fisicoquímicos como temperatura, oxígeno disuelto, salinidad, pH y %MO mostraron una variabilidad temporal significativa, asociada a los cambios hidrológicos e hidrodinámicos durante Lluvias, Nortes y Secas. Estos parámetros son importantes porque afectan la solubilidad, movilidad y disponibilidad de los metales asociados a los sedimentos y explican los aumentos de concentración de algunos metales en puntos de muestreo definidos.
- El Ni es el único metal que presenta variaciones temporales significativas. Los metales (Ni, Cd, Mn, Cu y Pb) presentan las mayores concentración en época de Secas, con excepción de Sn y As que presentaron la mayor concentración en épocas de Nortes asociado principalmente a las fuentes antropogénicas presentes en el sitio como son los basureros informales, desechos domésticos y actividades marítimo-portuarias, y Fe, Zn, Cr y Al en época de Lluvias están asociados primordialmente por la lixiviación de las zonas adyacentes al sistema.
- La concentración total de metales en sedimentos, promedio durante las tres épocas fue de Al(0.98%)>Fe(0.29%)>Zn(42.22 $\mu\text{g g}^{-1}$)>Ni(22.08 $\mu\text{g g}^{-1}$)>Mn(17.96 $\mu\text{g g}^{-1}$)>Cu(16.84 $\mu\text{g g}^{-1}$)>As(11.87 $\mu\text{g g}^{-1}$)>Cr (2.75 $\mu\text{g g}^{-1}$)>Pb(1.63 $\mu\text{g g}^{-1}$)>Sn(1.43 $\mu\text{g g}^{-1}$)>Cd(0.73 $\mu\text{g g}^{-1}$).
- El riesgo actual para la biota bentónica de laguna costera de Ría Lagartos es significativo. Los metales que contribuyen a este riesgo son Cu, Ni, As, Sn y Cd, que rebasan el nivel de daño a la biota bentónica de los SQuiRTs.
- Para Pb, Cd, As, Zn, Cu, Cr y Ni se tiene un punto de muestreo en común que presenta concentraciones elevadas de estos metales el cual es RL11. En dicho existen fuentes antropogénicas cercanas y también, sus características hidrodinámicas y fisiográficas promueven la presencia de altos contenidos de

materia orgánica a la que se adsorben los metales, que precipitan al sedimento.

- En estudios realizados en agosto del 2010 a mayo del 2011 la laguna en general no presentó problemas serios de contaminación con excepción del As y Sn que fueron los únicos que excedieron el límite que reporta los SQuiRTs para daño mínimo a la biota bentónica. Para el estudio realizado en agosto del 2011 a mayo del 2012, el número de metales que rebasan los límites de los SQuiRTs han aumentado, ya que en este año fueron Ni, As, Sn y Cd presentado un nivel de efecto bajo para la biota bentónica, lo que indica un incremento en el tiempo de estos metales en sedimentos. Si este patrón continúa, podría presentarse un escenario de daño para los organismos no sólo bentónicos de la Ría y por ende para la salud humana.
- Se identificaron las fuentes productoras de metales en la periferia de la laguna y se determinó que las estaciones cercanas a las mismas presentaron un incremento de concentración de los metales.
- Así también se presentaron incrementos de metales relacionados con la presencia de ojos de agua en el área, lo que indica un transporte a la ría a través del sistema del acuífero de Yucatán.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, V., Senior, W., Martínez, G., "Niveles De Metales Pesados En Sedimentos Superficiales En Tres Zonas Litorales De Venezuela", Asociación Interciencia.
- Al-Ghadban, A. N. Jacob P. G. Abdali F. "Total Organic Carbon in the Sediments of the Arabian Gulf and Need for Biological Productivity Investigations." *Marine Pollution Bulletin Marine Pollution Bulletin* 28, no. 6 (1994): 356-362.
- Altındağ, A. and Yiğit S. "Assessment of Heavy Metal Concentrations in the Food Web of Lake Bey Ğehir, Turkey." *Chemosphere*. 60, no. 4 (2005): 552-556.
- Arcega-Cabrera F, Armienta M. A., Daesslé L. W., Castillo-Blum S. E., Talavera O. and Dótor A. "Variations of Pb in a Mine-Impacted Tropical River, Taxco, Mexico: Use of Geochemical, Isotopic and Statistical Tools." *AG Applied Geochemistry* 24, no. 1 (2009): 162-171.
- Arcega-Cabrera F, Norena-Barroso E and Ocegüera-Vargas I. "Lead from Hunting Activities and Its Potential Environmental Threat to Wildlife in a Protected Wetland in Yucatan, Mexico." *Ecotoxicol. Environ. Saf. Ecotoxicology and Environmental Safety* 100, no. 1 (2014): 251-257.
- Armienta, M. A. , Dotor A., Arcega-Cabrera F. E., Talavera O., Aguayo A., Ceniceros N. and Cruz O. "Assessing Water-Sediment Processes for Metals in Rivers Polluted by Mining to Predict Environmental Impacts in Developing Countries." *IAHS PUBLICATION*, no. 314 (2007): 155-162.
- Baird, Colin. *Química Ambiental*. Barcelona: Editorial Reverté, 2001.
- Banks E, Ferretti L. E. and Shucard D. W. "Effects of Low Level Lead Exposure on Cognitive Function in Children: A Review of Behavioral, Neuropsychological and Biological Evidence." *Neurotoxicology* 18, no. 1 (1997): 237-81.
- Beadle, L. C. "Prolonged Stratification and Deoxygenation in Tropical Lakes. I. Crater Lake Nkugute, Uganda, Compared with Lakes Bunyoni and Edward." *Limnol. Oceanogr. Limnology and Oceanography* 11, no. 2 (1966): 152-163.
- Bohn, Hinrich L. McNeal Brian Lester O'Connor George A. Sánchez Orozco Mario. *Química Del Suelo*. México: Limusa, 1993.

- Bradl, H. B. *Heavy Metals in the Environment : [Origin, Interaction and Remediation]*. Amsterdam; Boston: Elsevier Academic Press, 2005.
- Buchman, M.F., 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 pages.
- Campbell, P. G. C. Dubreuil B. Hansen H. J. Canada Ministère des pêches et des océans Institut Maurice-Lamontagne. Comportement Géochimique De L'aluminium Dans Quelques Rivières À Saumon De La Côte-Nord (Golfe Du Saint-Laurent). Mont-Joli, Qué.: Pêches et océans, Canada, 1989.
- Casas Zapata, Juan Carlos Palacio Baena Jaime Alberto. "Relación Entre La Granulometría, El Ph Y El Mercurio En Los Sedimentos Del Río Negro." *Ingeniería Hoy*, no. 23 (2005).
- CONANP. *Programa De Conservación Y Manejo, Reserva De La Biosfera Ría Lagartos, México.*, 2007.
- Chapman, Peter M. "Management of Coastal Lagoons under Climate Change." *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 110, (2012): 32-35.
- Cheng, T. and Allen H. E. "Comparison of Zinc Complexation Properties of Dissolved Natural Organic Matter from Different Surface Waters." *Journal of Environmental Management* 80, no. 3 (2006): 222-229.
- Dallinger, R. Prosi F. Segner H. Back H. "Contaminated Food and Uptake of Heavy Metals by Fish: A Review and a Proposal for Further Research." *Oecologia* 73, no. 1 (1987): 91-98.
- Dassenakis, M. Scoullou M. Gaitis A. "Trace Metals Transport and Behaviour in the Mediterranean Estuary of Acheloos River." *Marine pollution bulletin*. 33, no. 2 (1997): 103.
- Fergusson, J. E. *The Heavy Elements : Chemistry, Environmental Impact, and Health Effects*. Oxford; New York: Pergamon Press, 1990.

- Florence, T. M. and Batley. "Determination of the Chemical Forms of Trace Metals in Natural Waters, with Special Reference to Copper, Lead, Cadmium and Zinc." *Talanta Talanta* 24, no. 3 (1977): 151-158.
- Förstner, Ulrich Wittmann G. T. W. *Metal Pollution in the Aquatic Environment*. Berlin; New York: Springer-Verlag, 1983.
- Galán-Huertos, E. and A. Romero-Baena. "Contaminación De Suelos Por Metales Pesados." *Macla* 10, (2008): 48-60.
- Greenwood, N. N. and Earnshaw A. *Chemistry of the Elements*. Oxford [Oxfordshire]; New York: Pergamon Press, 1984.
- Gross M Grant. 1982. *Oceanography: A View of the Earth*. Prentice Hall Inc. Englewood Cliffs, NJ, 497pp.
- Guo, Laodong Santschi Peter H. "Isotopic and Elemental Characterization of Colloidal Organic Matter from the Chesapeake Bay and Galveston Bay." *Marine Chemistry Marine Chemistry* 59, no. 1-2 (1997): 1-15.
- Guo, Tingzong DeLaune R. D. Patrick W. H. "The Influence of Sediment Redox Chemistry on Chemically Active Forms of Arsenic, Cadmium, Chromium, and Zinc in Estuarine Sediment." *Environment International* 23, no. 3 (1997): 305-316.
- Hamza-Chaffai A, Roméo M. el Abed A. "Heavy Metals in Different Fishes from the Middle Eastern Coast of Tunisia." *Bulletin of environmental contamination and toxicology* 56, no. 5 (1996): 766-73.
- Hansen A.M, Marquez-Pacheco H. "Procedimiento Para Evaluar Cargas Internas De Nutrientes En Cuerpos De Agua." *Rev. Mex. Cienc. Geol. Revista Mexicana de Ciencias Geologicas* 29, no. 1 (2012): 265-275.
- Harris, E. D. "Copper Transport: An Overview." *Experimental Biology and Medicine Experimental Biology and Medicine* 196, no. 2 (1991): 130-140.

Hellawell, J. M. *Biological Indicators of Freshwater Pollution and Environmental Management*. London: Elsevier Biomedical Press, 1989.

Henrichs, Susan M. "Early Diagenesis of Organic Matter in Marine Sediments: Progress and Perplexity." *Marine Chemistry Marine Chemistry* 39, no. 1-3 (1992): 119-149.

Herrera-Silveira, J. A. Comin F. A. Aranda-Cirerol N. Troccoli L. Capurro L. "Coastal Water Quality Assessment in the Yucatan Peninsula: Management Implications." *Ocean and Coastal Management* 47, no. 11-12 (2004): 625-639.

Herrera-Silveira, J.A. . "Lagunas Costeras De Yucatán (Se, México): Investigación, Diagnóstico Y Manejo." *Ecotropicos*. 19, (2006): 94-108.

Herrera-Silveira, J.A. and F.A. Comín. "An Introductory Account of the Types of Aquatic Ecosystems of Yucatan Peninsula (Se Mexico). ." *Ecovision World Monographs Series*. , (2000): 213-227.

Hutchinson, George Evelyn. *A Treatise on Limnology*. Vol. 3, 1957.

IPChS. International Programme on Chemical Safety 1991.

IUPAC. International Union of Pure and Applied Chemistry 2006. Transition metal.

Jacobs, Lucinda Emerson Steven. "Trace Metal Solubility in an Anoxic Fjord." *Earth and Planetary Science Letters Earth and Planetary Science Letters* 60, no. 2 (1982): 237-252.

Kelderman, P. and Osman A. "Effect of Redox Potential on Heavy Metal Binding Forms in Polluted Canal Sediments in Delft (the Netherlands)." [*Titel onbekend*]; 41(18), 4251-4261, (2007).

Kennish, Michael J. *Ecology of Estuaries* 1, 1. Boca Raton, Fla.: CRC Pr., 1986.

Lenntech. "Water Treatment Solutions." (2011).

- Loring, D. H. Rantala R. T. T. "Manual for the Geochemical Analyses of Marine Sediments and Suspended Particulate Matter." *Earth Science Reviews* 32, no. 4 (1992): 235-283.
- Manahan, Stanley E. *Introducción a La Química Ambiental*. Barcelona; México D. F.: Editorial Reverté ; Universidad Nacional Autónoma de México, 2007.
- Mansfeldt, Tim. "Redox Potential of Bulk Soil and Soil Solution Concentration of Nitrate, Manganese, Iron, and Sulfate in Two Gleysols." *J. Plant Nutr. Soil Sci. Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 167, no. 1 (2004): 7-16.
- Mee, L.D., V.E. Noshkin and A. Walton. "Worldwide Quality Control for Measuring Contaminants in the Marine Environment - 15 Years of Progress at the International Laboratory of Marine Radioactivity." *AEA Bull* 31, (1989): 32-36.
- Newman, M. *Fundamentals of Ecotoxicology*. United States, 1998.
- Nordberg, Gunnar *Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo*. México 1998.
- Olmestad and R. Durán. *Problemas Ecológicos De La Península De Yucatán.*, 1993.
- Patrick, W.H., Jr. and R.D. DeLaune. "Chemical and Biological Redox Systems Affecting Nutrient Availability in the Coastal Wetlands." *Geoscience Man*. 18, (1977): 131-137.
- Ponce Vélez, G. Vázquez Botello, Alfonso. . "Aspectos Geoquímicos Y De Contaminación Por Metales Pesados En La Laguna De Términos, Campeche." *Hidrobiológica* 1, (1992): 1-10.
- Rainbow, P. "Trace Metal Concentrations in Aquatic Invertebrates: Why and So What?" *Environmental Pollution* 120, no. 3 (2002): 497-507.
- Ritcey, G. M. *Tailings Management : Problems and Solutions in the Mining Industry*. Amsterdam; New York: Elsevier, 1989.
- Robertson, B. M. . "The Nutritive Value of Five Browse Legumes Fed as Supplements to Goats Offered a Basal Rice Straw Diet." The University of Queensland, 1988.

- Rodriguez de la Rúa, A. Arellano J. M. "Acumulacion De Cobre Y Alteraciones Histopatologicas En El Ostion *Crassostrea Angulata*." *Ciencias Marinas (Baja California, Mexico)* 31, no. 03 (2005): 2005.
- Rosenzweig, R. "Biotic Generation of Arsenic(III) in Metal(loid)-Contaminated Freshwater Lake Sediments." (1998).
- Rouhi, A.M. . "Escorting Metal Ions: Protein Chaperone Protects, Guides, Copper Ions in Transit." *Chemical and Engineering News* 11, (1999): 34-35.
- Sadiq, Muhammad. *Toxic Metal Chemistry in Marine Environments*. New York: Marcel Dekker, 1992.
- Salomons, W. Förstner Ulrich. *Metals in the Hydrocycle*. Berlin; New York: Springer-Verlag, 1984.
- Salomons, Wim. *Metals in the Hydrocycle*. [S.l.]: Springer, 2012.
- Salomons, W. Stigliani William M. Biogeodynamics of Pollutants in Soils and Sediments : Risk Assessment of Delayed and Non-Linear Responses. Berlin; New York: Springer-Verlag, 1995.
- SEMARNAT. *Norma Oficial Mexicana Nom-001-Semarnat-1996, Que Establece Los Límites Máximos Permisibles De Contaminantes En Las Descargas De Agua Residuales En Aguas Y Bienes Nacionales.*, 1997.
- Tam, N. F. Y. Wong Y. S. "Spatial and Temporal Variations of Heavy Metal Contamination in Sediments of a Mangrove Swamp in Hong Kong." *Marine Pollution Bulletin Marine Pollution Bulletin* 31, no. 4-12 (1995): 254-261.
- Tapia González, Fedro U. Herrera-Silveira Jorge A. Aguirre-Macedo Maria L. "Water Quality Variability and Eutrophic Trends in Karstic Tropical Coastal Lagoons of the Yucatán Peninsula." *YECSS Estuarine, Coastal and Shelf Science* 76, no. 2 (2008): 418-430.
- Tebbutt, T. H. Y. *Principles of Water Quality Control*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1999.

Tulonen, T., Pihlstrom M., Arvola L. and Rask M. "Concentrations of Heavy Metals in Food Web Components of Small, Boreal Lakes." *BOREAL ENVIRONMENT RESEARCH* 11, no. 3 (2006): 185-194.

Urrutia, R., Yevenes M., Barra R. and Original Language. "Determinación De Los Niveles Basales De Metales Traza En Sedimentos De Tres Lagos Andinos De Chile: Lagos Chungara, Laja Y Castor." *Boletín de la Sociedad Chilena de Química*. 47, (2002): 457-468.

Valdespino, J. "Determinación De Metales Pesados En *Thalassia Testudinum* En Dos Zonas De La Península De Yucatán." UNAM, 2005.

Vásquez Botello, Alfonso Páez Federico. *El Problema Crucial La Contaminación*. México: Centro de Ecodesarrollo, 1987.

Vázquez Botello, Alonso; Hicks E. y Mendelli E. F. . "Estudios Preliminares Sobre Los Niveles De Algunos Contaminantes En La Laguna De Términos, Camp., México." *Simposio sobre adelantos en las investigaciones marinas en el Caribe y regiones adyacentes*. Caracas 1976, 267-280.

Villanueva F., Susana and Alfonso. Vázquez Botello. "Metales Pesados En La Zona Costera Del Golfo De México Y Caribe Mexicano." *Rev. Int. Contam. Ambient.* 8, (1992): 47-61.

Walkley, A. Black I. Armstrong. *An Examination of the Degtjareff Method for Determining Soil Organic Matter, and a Proposed Modification of the Chromic Acid Titration Method*. Baltimore: Williams & Wilkins, 1934.

Zamacona Evenes J, Pérez- Aranda L. and Chumba Segura L. *Fauna De Los Cenotes De Yucatan*. Merida, Yuc., Mexico: Universidad de Yucatan, 1983.

ABREVIATURAS

Abreviaturas	Significado
MO	Materia Orgánica
TEL	Nivel de Efecto mínimo
ERL	Nivel de Efecto Bajos
PEL	Nivel de Efecto Probable
ERM	Mediana de rango de efectos
AET	Efecto mínimo evidente
MF	Material Fino
AA	Absorción Atómica
FQS	Fracción Química Secuencial
NOAA SQuiRTs	National Oceanic and Atmospheric Administration- Screening Quick Reference Table for Inorganics in Solids
IUPAC	La Unión Internacional de Química Pura y Aplicada
USEPA	Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos
CONANP	Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas
SEMARNAT	Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
INE	Instituto nacional de estadística
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía