



Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.

Posgrado en Ciencias del Agua

EVALUACIÓN AMBIENTAL DE LA CONTAMINACIÓN
POR METALES EN LA LAGUNA MANATÍ, UNA ZONA
SUJETA A CONSERVACIÓN ECOLÓGICA EN
AMBIENTE URBANO

Tesis que presenta

DINO CLAYDE HENSLEY DEMIDOF

En opción al título de

MAESTRO EN CIENCIAS DEL AGUA

Cancún, Quintana Roo, México.

2022

DECLARACIÓN DE PROPIEDAD

Declaro que la información contenida en la sección de Materiales y Métodos, los Resultados y Discusión de este documento proviene de las actividades de investigación realizadas durante el período que se me asignó para desarrollar mi trabajo de tesis, en las Unidades y Laboratorios del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., y que a razón de lo anterior y en contraprestación de los servicios educativos o de apoyo que me fueron brindados, dicha información, en términos de la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial, le pertenece patrimonialmente a dicho Centro de Investigación. Por otra parte, en virtud de lo ya manifestado, reconozco que de igual manera los productos intelectuales o desarrollos tecnológicos que deriven o pudieran derivar de lo correspondiente a dicha información, le pertenecen patrimonialmente al Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., y en el mismo tenor, reconozco que si derivaren de este trabajo productos intelectuales o desarrollos tecnológicos, en lo especial, estos se registrarán en todo caso por lo dispuesto por la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial, en el tenor de lo expuesto en la presente Declaración.

Firma: 
Nombre: Dino Clayde Hensley Demidof

*CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA DE YUCATÁN, A. C.
POSGRADO EN CIENCIAS DEL AGUA*



RECONOCIMIENTO

Por medio de la presente, hago constar que el trabajo de tesis de **Dino Clayde Hensley Demidof** titulado “***Evaluación ambiental de la contaminación por metales en la Laguna Manatí, una zona sujeta a conservación ecológica en ambiente urbano***”, fue realizado en la Unidad de Ciencias del Agua, en la Línea de Ecosistemas Acuáticos y Calidad del Agua, en el laboratorio de Fisicoquímicos, y en el laboratorio de Ecotoxicología del Centro de Investigación Científica de Yucatán A.C. bajo la dirección del Dr. Eduardo Cejudo Espinosa y del Dr. Jesús Alvarado Flores, perteneciente al Programa de Posgrado en Ciencias del Agua de este Centro.

Atentamente

Dra. Cecilia Hernández Zepeda
Directora de Docencia

Cancún, Quintana Roo, México, a 18 de mayo 2022

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Eduardo Cejudo Espinosa y el Dr. Jesús Alvarado-Flores, por mi formación en el Posgrado de Ciencias del Agua, aceptarme como su estudiante, y por sus enseñanzas, dedicación y guía durante todo el proceso para realizar la tesis.

Al Dr. Gilberto González Acosta y el Dr. Ignacio Alejandro Pérez Legaspi por sus correcciones, asistencia e ideas en mis avances de mi trabajo de investigación, durante los seminarios de investigación y exámenes tutoriales, con el objetivo de mejorar este trabajo de investigación con gran importancia para la salud ambiental.

Al CONACYT por proporcionar una beca para estudiar en México, y elaborar la tesis (Número de becario: 1063500).

Al Programa de Becas CONACYT-OEA- AMEXCID por el apoyo económico proporcionado.

Al laboratorio de Ecotoxicología Acuática y al laboratorio de Físicoquímicos, en específico, a la compañera Dilsa Morales Pérez, y la Química Daniela Ortega Camacho por su paciencia, por instruirme y ayudarme en los análisis de las muestras de agua, sedimento y biota acuática. A Jorge Peniche Pérez por su ayuda en la toma de muestras. A mis amigos de la generación 2020 y de la UCIA, Andrés, Brianda, Gerardo, Juan Carlos, Mariana Pedro y Yasmín, por permitirme pasar tiempos valiosos con ustedes. También gracias por compartir información científica, la cultura y gastronomía mexicana, historias y la vida estudiantil conmigo. Les agradezco muchísimo.

Al conjunto de profesores de la Unidad de Ciencias por abrir sus oficinas para consultas, las instalaciones de los laboratorios, áreas de práctica y, además, gracias por contar sus experiencias de la investigación, para estar vigente como estudiante durante mi investigación.

Al Instituto de Biodiversidad y Áreas Naturales Protegidas del Estado Quintana Roo (IBANQROO), y sus trabajadores el Biol. Gonzalo Aldana, Biol. Mónica Salas y Eddy, por su apoyo para visitar la Laguna Manatí y ayuda en la colecta de mis muestras de agua, sedimento y organismos zooplanctónicos.

Al Dr. Chaney St. Martin and Dr. Curt D. Delice del Instituto Inter-americano de Cooperación en la Agricultura (IICA).

DEDICATORIA

A mis abuelas Helené Demidof y Elisabeth Bijnaar, les dedico mi trabajo de investigación, porque han invertido en mi vida, en mi educación, y también me han mostrado como ser un hombre valiente, y siempre estar listo para cuidar mi familia. Ustedes son las verdaderas guerreras de la familia.

A mis hermanos y hermanas; Ifanildo, Gaytano, Syreeta, N'gina y Stephanie, mi tío Archie, mis tías Olivia, Patricia y Louise, en todas fases de mi vida fueron presentes, y funcionaban como respaldo, motivación, fuerte e inspiración. Ustedes son gran parte de todos mis éxitos, que he logrado en mi vida profesional.

A mis amigos/ compañeros en México y Surinam, Juan Carlos, Pedro, Esperanza, Brianda, Ranish, Ryan, Mr. Richenel Davids, les dedico este trabajo a ustedes, por invitarme de ser parte de sus vidas y divertimientos.

A los directores de tesis, Dr. Eduardo Cejudo Espinosa y el Dr. Jesús Alvarado Flores, aunque tuvimos una barrera de lenguaje, en mi trabajo de investigación, mostraron que son accesibles, aptos para cumplir con los objetivos, y sobre todo su amistad me ayudó mucho de concentrarme en mis estudios.

A mi familia Demidof, Hoepel, Bijnaar, van der Kooye, por motivarme, apoyarme en las finanzas, y comunicar conmigo durante el periodo de la pandemia, y lejos de mi casa.

A mi esposa Minerva G. Demidof-Alendy, es difícil superar una vida exitosa sin tu virtud, sabiduría, amor y sacrificios. A ti te dedico este trabajo de investigación, por estar aproximadamente dos años cuidando de nuestra creatura, nuestro hijo, sin mi presencia.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO 1. ANTECEDENTES	2
1.1 Generalidades de metales.....	2
1.2 Contaminación ambiental por metales pesados.	3
1.3 Contaminación ambiental por metales pesados en el mundo y algunos ejemplos en México.	5
1.4 Contaminación ambiental por metales en la península de Yucatán.	8
1.5 Zooplancton como bioindicador de la presencia de metales.....	14
1.6 Factores de bioconcentración, bioacumulación y biodisponibilidad.	16
1.7 Evaluación de riesgo ambiental.	18
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	19
JUSTIFICACIÓN.....	20
HIPÓTESIS.	21
OBJETIVO GENERAL.....	22
CAPITULO 2 MATERIALES Y MÉTODOS.....	23
2.1 Descripción del área de estudio.....	23
2.2 Colecta de Muestras de agua	24
2.3 Colecta de sedimento.....	27
2.3.1 Determinación de pH, materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico en	28
2.4 Colecta de zooplancton.	29
2.4.1 Determinación de riqueza y abundancia de especies.....	30
2.4.2 Cuantificación de metales en biota acuática.	31
2.5 Análisis de los datos	31
2.6 Obtención de los factores de bioacumulación.....	32
2.7 Determinación del grado de la contaminación ambiental usando los factores de enriquecimiento (<i>FE</i>) y los índices de geoacumulación (<i>I_{geo}</i>).....	32
2.8 El índice de riesgo ecológico potencial en sedimento (RI)	34
2.9 El factor de evaluación del riesgo y umbral de riesgo ambiental	35
CAPITULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	37
3.1 Resultados de parámetros fisicoquímicos en agua y sedimento.	37
3.2 Resultados de la cuantificación de metales en agua y sedimento.	38
3.3 Resultados de riqueza y abundancia de zooplancton.	40
3.4 Resultados de cuantificación de metales en zooplancton	42

3.5 Determinación factores de enriquecimiento (<i>FE</i>) e índices geoacumulación (<i>I_{geo}</i>).....	43
3.6 Evaluación del riesgo ambiental	49
3.7 DISCUSIÓN	53
3.7.1 Parámetros fisicoquímicos en agua y sedimento.	53
3.7.2 Riqueza y abundancia	55
3.7.3 Análisis de riesgo ambiental de la Laguna Manatí.....	58
4. CONCLUSIONES.....	66
Referencias	67
ANEXOS	78

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Las referencias de SQuiRTs para metales en sedimentos establecidos (Buchman, 2008) y canadiense (ISQG- Interim Sediment Quality Guideline), y niveles de fondo de referencia para Estados Unidos TEL-Nivel de Efecto Tóxico (por sus siglas en inglés, Toxic Effect Level). Concentraciones expresadas en partes por billón (ppb).	8
Tabla 2. Concentraciones basales para sedimentos adoptados para la Laguna Manatí.....	33
Tabla 3. Clasificación de riesgo ecológico (Eir) por cada metal según Hakanson (1980).	35
Tabla 4. Clasificación del potencial de riesgo (RI); contaminación total de metales pesados. ...	35
Tabla 5. Factor de evaluación de riesgo acorde a Karlsson (2008) con grupo de base.	36
Tabla 6. Evaluación del umbral de riesgo ambiental acorde a Karlsson (2008).	36
Tabla 7. Parámetros fisicoquímicos del agua en cuatro secciones de Laguna Manatí. Valores Promedio \pm d.e.	37
Tabla 8. Resultados del sedimento analizados en el laboratorio.....	37
Tabla 9. Metales pesados en las muestras de agua.	38
Tabla 10. Cuantificación promedio de metales pesados en las muestras de sedimento.....	39
Tabla 11. Especies encontradas en el periodo seco.....	40
Tabla 12. Abundancia de la Zona 1 (Canal de drenaje).....	41
Tabla 13. Abundancia de la Zona 2 (este de Laguna Manatí).....	41
Tabla 14. Abundancia de la Zona 3 (oeste de Laguna Manatí).....	41
Tabla 15. Abundancia de la Zona 4 (norte de Laguna Manatí).	41
Tabla 16. Riqueza de especies de zooplancton (Margalef) en Laguna Manatí.	42
Tabla 17. Metales pesados en las muestras de biota acuática.	42
Tabla 18. Evaluación de potencial de riesgo ecológico (RI) en Laguna Manatí.	50
Tabla 19. Evaluación del umbral de riesgo ambiental (RQ) según Karlsson (2008) con MEC teórico de la Laguna Manatí (agua) y PNEC previamente reportados. PNEC= CL50/1000. RQ= (MEC/ PNEC).....	59
Tabla 20. Contenidos promedios de metales pesados en sedimento en estudios previos de México y en Quintana Roo. Metales expresados en mg/Kg.	62

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de área de estudio, Laguna Manatí, municipio de Benito Juárez, Quintana Roo.....	25
Figura 2. Colecta de agua en Laguna Manatí.....	26
Figura 3. Colecta de sedimento en la Laguna Manatí.....	27
Figura 4. Colecta de zooplancton con red de Wisconsin de 54 μm en la Laguna Manatí.....	29
Figura 5. Determinación de riqueza y abundancia.....	30
Figura 6. Los micro tubos de “Eppendorf” con los organismos se calienta en un baño ácido a temperatura de 100.0-100.2° C.....	31
Figura 7. Diagrama de flujo para determinar la contaminación ambiental del área de estudio laguna Manatí, situada en la zona urbana de Cancún, noreste del estado Quintana Roo.....	34
Figura 8. Factor de enriquecimiento aplicado a sedimento de Laguna Manatí (Canal de Drenaje).....	43
Figura 9. Factor de enriquecimiento aplicado a sedimento de Laguna Manatí (Zona Este).....	44
Figura 10. Factor de enriquecimiento aplicado a sedimento en la Laguna Manatí (Zona Oeste).....	45
Figura 11. Factor de enriquecimiento aplicado en sedimento de Laguna Manatí (Zona Norte).	45
Figura 12. Factores de enriquecimiento del Zn en la Laguna Manatí.....	46
Figura 13. Igeo aplicada a sedimento de la Laguna Manatí (canal de drenaje)	47
Figura 14. Igeo aplicada a sedimento de la Laguna Manatí (zona este).	47
Figura 15. Igeo aplicada a sedimento de la Laguna Manatí (zona oeste).	48
Figura 16. Igeo aplicada a sedimento en la Laguna Manatí (zona norte).....	48
Figura 17. Igeo del elemento Zn en la Laguna Manatí... ..	49
Figura 18. Ajuste lineal de metal potencialmente contaminante, Al vs Fe. P1 y P3 (Canal de Drenaje), valores inferiores al ajuste 95% I.C.: P2 (Canal de Drenaje).	51
Figura 19. Ajuste lineal de metal potencialmente contaminante, Cu vs Fe. P2 (Canal), P6 (Zona este), valores inferiores al ajuste 95% I.C.: P1, P3 (Canal de Drenaje).....	51
Figura 20. Ajuste lineal de metal potencialmente contaminante, Ni vs Fe. P4 (Zona este), P12 (Zona oeste), P2 (Canal de Drenaje), valores inferiores al ajuste 95% I.C.: P1 y P3 (Canal de Drenaje).	52

Figura 21. Ajuste lineal de metal potencialmente contaminante, Zn vs Fe., valores superiores al ajuste 95% I.C.: P12 (Zona oeste), P4 (Zona este), P2 (Canal de Drenaje), valores inferiores al ajuste 95% I.C.: P1 y P3 (Canal de Drenaje). 52

RESUMEN

Los estudios previos de la cuantificación de elementos potencialmente tóxicos en las matrices ambientales agua, sedimento y biota acuática, han señalado la presencia de metales en el ambiente urbano del estado de Quintana Roo. Las investigaciones han mostrado que los metales pesados como Cr, Cd, Pb y Zn, tienen gran importancia con respecto a la contaminación ambiental y salud pública, y además son considerados por la Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR), como prioritarios por su condición de no biodegradables y su capacidad de bioacumularse y biomagnificarse en la red trófica. En este trabajo de investigación se estudió la presencia de varios metales de interés en la Laguna Manatí en el noreste del estado de Quintana en periodo de sequía (abril 2021). Se midieron metales en matrices ambientales para identificar si las concentraciones en agua y sedimentos sobrepasan los límites máximos permisibles según las referencias Screening Quick Reference Tables, (SQuiRTs, por sus siglas en inglés) (Buchman, 2008). Los resultados se utilizaron para realizar un análisis de riesgo ambiental según los métodos de Karlsson (2008), para determinar las implicaciones ecológicas y a la salud del medio biofísico. Los resultados mostraron que, en las 12 muestras de agua y la biota acuática, las concentraciones de los metales están debajo del límite de detección ($<0.02 \text{ mg L}^{-1}$), sin embargo, en el sedimento de la Laguna Manatí, se detectaron 10 metales (Al, Ba, Co, Cu, Cr, Fe, Mn, Ni, Pb y Zn), un semi-metal (B) con espectrómetro de emisión óptica de plasma con acoplamiento inducido (ICP-OES). Los metales Cu y Zn se encuentran con concentraciones de 50.0 y $2661.5 \text{ mg kg}^{-1}$ respectivamente, ambos por encima de las referencias de SQuiRTs y las guías provisionales de calidad del medio ambiente de Canadá. En la zona este de la Laguna Manatí, el metal Zn está con un valor de 386 mg kg^{-1} , por arriba de las guías provisionales de calidad del medio ambiente de Canadá. Los valores de pH (6.3-7.7), materia orgánica (0.1-0.8 %) y capacidad de intercambio catiónico en sedimento ($67\text{-}237 \text{ meq } 100 \text{ g}^{-1}$) tienen valores variables, pero no parecen ser determinantes en la disponibilidad y movilidad de los metales. Los factores de enriquecimiento (*FE*) del Zn en la zona este de la Laguna Manatí tiene valor máximo de 388.48 e índices de geoacumulación (I_{geo}) en el canal de drenaje con valores máximos de 6.47. En toda la Laguna Manatí el elemento Zn muestra riesgos ambientales graves y es necesario monitorear este metal para preservación de la Laguna Manatí.

ABSTRACT

Previous studies on the quantification of potential toxic elements in the environmental matrices of water, sediment and aquatic biota, have indicated the presence of metals in the urban environment of the state of Quintana Roo. Research has shown that metals such as Cr, Cd, Pb y Zn are of great importance with respect to environmental pollution and public health, they are also considered by the Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR), as priority due to their non-biodegradable condition and capacity to bioaccumulate and biomagnify in the trophic net. In this research, the presence of several metals of interest in the Laguna Manatí have been studied, located in the northeast of the state of Quintana Roo, during the dry period (April 2021). We explored whether the concentrations in water and sediments exceed the references according to the Screening Quick Reference Tables (SQuiRTs), Buchman, 2008. The results are used to perform an environmental risk analysis according to the methods of Karlsson (2008), to determine the ecological implications and the health of the biophysical setting. The results show that in water and aquatic biota, the concentrations of metals were below the detection limit ($<0.02 \text{ mg L}^{-1}$), however, in the sediment of Laguna Manatí, 10 metals were detected (Al, Ba, Co, Cu, Cr, Fe, Mn, Ni, Pb and Zn), and a nonmetallic element (B) with an inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES). In the drainage channel zone, in the south of Laguna Manatí, 10 metals were present in the sediment samples. The metals Cu and Zn are found in concentrations of 50.0 and $2661.5 \text{ mg kg}^{-1}$ respectively, both above the SQuiRTs references, and the Interim Canadian Environmental Quality Guidelines (CEQGs). In the eastern zone of Laguna Manatí, the metal Zn has a value of 386 mg kg^{-1} , above the Interim Canadian Environmental Quality Guidelines. The values of pH (6.3-7.7), organic matter (0.1-0.8 %) and cation exchange capacity in sediment (67 - $237 \text{ meq } 100\text{g}^{-1}$) have variable values, likely not determining the availability and mobility of metals. The enrichment factors (*FE*) of Zn in the eastern zone of Laguna Manatí have a maximum value of 388.48 and geoaccumulation indices (I_{geo}) with maximum values of 6.47 in the drainage channel. Throughout the Laguna Manatí, the element Zn shows serious environmental risks, and it is necessary to monitor this metal for the preservation of the Laguna Manatí.

INTRODUCCIÓN

Los metales son elementos químicos que forman fácilmente iones positivos y que, dependiendo de su concentración en el ambiente y la fuente de origen, son potencialmente tóxicos. La contaminación por metales se refiere a la presencia de dicho elemento químico en el ambiente en concentraciones mayores a las naturales, o la presencia de elementos que no deberían estar en el ambiente, y que han sido introducidas por algún factor externo, comúnmente antropogénico. Las principales fuentes de contaminación por metales en el ambiente son la minería, lixiviados de residuos sólidos, descargas de aguas residuales, aplicación de fertilizantes y plaguicidas, no obstante, la urbanización promovida por las actividades turísticas son también fuentes de contaminación.

Una vez liberados al ambiente, algunos metales son potencialmente tóxicos, pueden cuantificarse en aire, agua, suelos y organismos. La contaminación ambiental de ecosistemas acuáticos en México ha sido estudiada en las zonas industrializadas y en zonas con actividades ganaderas y agropecuarias; las grandes ciudades con una historia de industria o urbanización son propensas a ser contaminadas; sin embargo, las ciudades turísticas también pueden sufrir contaminación urbana. El impacto negativo de la urbanización es el aumento de actividades humanas en el entorno de los sistemas acuáticos.

En esta investigación se aborda el caso especial de Laguna Manatí, ubicada en el norte del estado de Quintana Roo, donde la urbanización y acumulación de residuos sólidos dispuestos de manera incorrecta representa potencial peligro ambiental y a la salud humana.

Se realizó una evaluación de riesgo ambiental de la Laguna Manatí debido al aumento de actividades antropogénicas y la urbanización, cuantificando las concentraciones de elementos metálicos en agua, zooplancton (rotíferos, copépodos, cladóceros y ostrácodos) y sedimentos; con el fin de determinar el riesgo ecológico en la Laguna Manatí por contaminación por metales. La laguna Manatí es un área natural protegida que quedó rodeada por vialidades y zonas habitacionales a consecuencia del crecimiento de Cancún por el turismo; esta investigación muestra el impacto que se puede medir en esta área protegida mediante una evaluación de riesgo.

CAPITULO 1. ANTECEDENTES

1.1 Generalidades de metales

Los metales son clasificados, dependiendo de su concentración, como elementos potencialmente tóxicos (PTE, por sus siglas en ingles), que existen naturalmente en la corteza terrestre y se encuentran ampliamente distribuidos en la tierra, donde por la intemperización y procesos geomorfológicos de rocas se encuentran en minerales (por ejemplo, Al_2O_3 , BaSO_4 , BaCO_3 etc.) (Davis, 2001; Nordberg *et al.*, 2007). Además de estar presentes en la corteza terrestre, varios metales están presentes en diferentes matrices ambientales (agua, sedimento, aire y suelo), proveniente de actividades antropogénicas, que aumentan las concentraciones en la naturaleza (USEPA, 1992). Algunos de los metales poseen propiedades importantes y participan en procesos metabólicos de los organismos, y se clasifican como elementos trazas (esenciales a bajas concentraciones como B, Co, Cu, Fe y Mn; Romero, 2001). Otras propiedades importantes de los metales es que poseen características de ser dúctiles y maleables, excelentes conductores de la corriente eléctrica y calor y forman componentes fundamentales en la fabricación de utensilios o forman parte esencial en los compuestos en la vida diaria (Nordberg *et al.*, 2007). Un aspecto particular de algunos metales es que pueden ocurrir con diferentes estados de oxidación en la naturaleza (Jacobs y Testa, 2005), con diferencia en propiedades y funcionalidades; por ejemplo, el cromo hexavalente Cr (VI), es más agresivo, irritante y corrosivo y tóxico que el cromo trivalente Cr (III) (Connett y Wetterhahn, 1983; De Flora *et al.*, 1990). Los metales han sido útiles a la humanidad desde tiempos antiguos y tiene una importante función en la vida cotidiana humana. Principalmente se usan en la construcción e infraestructura, en la industria eléctrica y en la producción de aparatos electrodomésticos (Davis, 2001). Además, los minerales de los metales se utilizan en la fabricación de agroquímicos y fertilizantes, fabricación de ladrillos, la industria de papel y la industria farmacéutica, entre otros. (Norseth, 1981; Wang *et al.*, 2006). La exposición a concentraciones elevadas de metales puede causar enfermedades pulmonares, especialmente a trabajadores que participan en la industria metalúrgica y la fabricación de agroquímicas y fertilizantes (ATDSR, 1999; ATDSR, 2004). Aunque existe evidencia que la exposición a algunos metales como Cr, Pb, Ni y Zn causa cáncer y otras enfermedades en los seres humanos y mamíferos terrestres, el mecanismo por lo cual se causa cáncer aún no se entiende completamente (ATDSR, 1999; O'Brien *et al.*, 2003; Chen *et al.*, 2009; Amoyaw- Osei *et al.*, 2011; Mazumdar *et al.*, 2011; Hou *et al.*, 2013).

1.2 Contaminación ambiental por metales pesados.

La contaminación ambiental es la presencia de sustancias o elementos químicos en el ambiente que no deberían estar en el ambiente, o están en altas concentraciones, y no deberían sobrepasar los límites máximos permitidos por la normatividad nacional (Chapman, 2007). Sin embargo, la contaminación por elementos potencialmente tóxicos, como los metales pesados, en agua, suelo y en la atmosfera que provienen por vía natural o antropogénica, son uno de los problemas más graves que afectan al medio ambiente (Szyzewski *et al.*, 2009) y la salud humana a nivel local y global (Reyes *et al.*, 2016). Las principales fuentes de contaminación por metales pesados en el medio ambiente son la minería, lixiviados, descargas de aguas residuales, aplicación de fertilizantes y plaguicidas, como consecuencia del desarrollo de la industria, la ganadería y las actividades turísticas (Wong *et al.*, 2006; Szyzewski *et al.*, 2009; Sevcikova *et al.*, 2011). Los metales pesados son elementos naturales caracterizados por su alta masa atómica, una densidad mayor a 5.0 g cm^{-3} , buenos conductores de la corriente eléctrica, y son tóxicos a bajas concentraciones (Tchounwou *et al.*, 2014; Koller y Saleh, 2018). Los metales pesados son considerados peligrosos para la vida acuática, animal y humana por su toxicidad, la capacidad de bioacumularse y biomagnificarse. Además, su naturaleza química los hace no biodegradables (Stankovic *et al.*, 2013). Algunos metales pesados como Cobre (Cu), Selenio (Se), Zinc (Zn), Cobalto (Co), Hierro (Fe), Molibdeno (Mo), Manganeseo (Mn) y Cromo (Cr) son esenciales para la salud humana con funciones indispensables para varios procesos biológicos, que también impulsan todo el metabolismo humano (Tchounwou *et al.*, 2014; Koller y Saleh, 2018).

Los seres humanos están expuestos a los metales pesados por vía oral, por la ingestión de alimentos y agua (Rai y Pal, 2002; Nava-Ruiz y Méndez-Armenta, 2011), también por la inhalación de sólidos suspendidos en el aire, por partículas gaseosas, el consumo de cigarrillos y la exposición pasiva del mismo (Navarro-Aviñó *et al.*, 2007; Nava-Ruiz y Méndez-Armenta, 2011). Los metales llegan al ser humano en sus actividades diarias en las ciudades debido a la inhalación del polvo urbano generado por tráfico vehicular y actividades industriales (Sternbeck *et al.*, 2002; Zapata-Carbonell *et al.*, 2017).

En los últimos años se ha incrementado la presencia y persistencia de los metales pesados en el medio ambiente, por lo tanto, se ha aumentado el interés de la población, las agencias de protección ambiental y los centros de investigación por ser un problema globalizado; todos están

interesados en conocer la magnitud de la contaminación y los riesgos al ecosistema y los problemas de salud pública (Stankovic *et al.*, 2013; Reyes *et al.*, 2016).

En esta investigación se han estudiado 11 elementos metálicos y no metálicos, clasificados en i) Clase A (aluminio y bario, reaccionan fácilmente con el oxígeno), ii) clase B (boro, elemento no-metálico), iii) clase C (cobalto, cobre, hierro, manganeso, níquel, plomo y zinc), y iv) clase D (cromo, un metal tóxico), (Calva y del Rocío-Torres, 2003). Una buena parte de estos elementos se consideran como metales esenciales en los procesos fisiológicos de los organismos, pero a bajas concentraciones (Stankovic, 2013). No obstante, el bario, cromo, níquel y plomo son considerados muy tóxicos, clasificados según la Agencia de Protección Ambiental (USEPA, por sus siglas en inglés) y la Agencia Internacional de Investigación de Cáncer (IARC, por sus siglas en inglés), como carcinógenos humanos. Por ejemplo, el aluminio es tóxico para los organismos terrestres y acuáticos y es móvil a pH ácido (Yong y Thomas, 1997).

Los metales potencialmente tóxicos, una vez liberados al medio ambiente, se acumulan en los suelos, sedimentos y biota (Stankovic *et al.*, 2014) y posteriormente se biomagnifican en su paso por las redes tróficas (Bryan y Langston, 1992; USEPA, 2014), lo que forma un peligro para el ambiente y los humanos. Estos elementos tóxicos pueden interferir metabólicamente con metales esenciales como hierro, calcio, cobre, y zinc (Abdulla y Chmielnicka, 1990; López-Alonso *et al.*, 2004) o reemplazar los metales trazas en importantes procesos fisiológicos y causar enfermedades graves o problemas a la salud humana (Tchounwou *et al.*, 2014).

Desde la Revolución Industrial (finales del siglo XIX), la contaminación por metales o metaloides en el ambiente ha crecido de forma exponencial. Los desechos de la fabricación de productos electrónicos o descargas residuales domésticas terminan en el medio ambiente, en lagunas, basureros, confinados o incinerados. Después de cierto tiempo, estos elementos potencialmente tóxicos, comienzan a lixiviar a su entorno cercano. Por ejemplo, los productos electrónicos tirados cercanos a cuerpos de agua o basureros clandestinos no regulados, con el paso del tiempo, generan contaminantes que pueden liberar elementos potencialmente tóxicos en agua, suelo y aire.

Otro problema son los residuos con metales que son vertidos al ambiente, afectando las comunidades cercanas y la vida acuática (Jacott, 2005). Todo en consecuencia del crecimiento desordenado de la zona urbana y el aumento de las descargas domésticas han sido los factores

principales de la urbanización, responsables del incremento de los niveles de concentración de elementos potencialmente tóxicos (Villanueva y Botello, 1998; Flores *et al.*, 2018).

El grado de la contaminación ambiental por metales pesados en sistemas acuáticos depende de la concentración y el periodo de la exposición, de factores físicos, químicos y biológicos, la ruta de la exposición y la toxicidad (Tchounwou *et al.*, 2014). Un metal pesado se considera tóxico cuando excede los límites máximos permisibles o las referencias establecidas en un ambiente determinado (Rainbow y Luoma, 2011). El organismo puede continuar con sus procesos fisiológicos sin ser afectado a exposición de bajas concentraciones; pero cuando el organismo acumula concentraciones por encima del límite tolerable, se intoxica y muere. La contaminación por metales en el medio ambiente puede representar un peligro cuando los metales comienzan a bioacumularse y biomagnificarse en la cadena trófica, y más severa cuando los humanos aprovechan de estos organismos para su alimentación.

1.3 Contaminación ambiental por metales pesados en el mundo y algunos ejemplos en México.

Cuando una población extrae productos para su alimentación de un ecosistema acuático, es necesario monitorear los contaminantes prioritarios y tóxicos que se descargan en su entorno, para lograr determinar la salud del ambiente. Se recomienda que la población urbana que utiliza un ambiente acuático para su abastecimiento de nutrientes o para actividades recreativas, deba conservar el ambiente en las mejores condiciones posibles (Chowdhury *et al.*, 2016). Las descargas de aguas residuales mal tratadas en los sistemas acuáticos, así como descargas sin tratamiento proveniente de actividades económicas como talleres mecánicos o unidades de reparación de motores de combustión, contienen elementos potencialmente tóxicos, considerados como contaminantes que potencialmente afectan la flora y fauna en muchos países en desarrollo (Gupta *et al.*, 2008). Los lixiviados generados por los aparatos electrónicos desechados de manera incorrecta, puede terminar en contacto directo con los sistemas acuáticos. Los elementos potencialmente tóxicos de carácter no biodegradables, transportados en los lixiviados y depositados a los sedimentos, poseen la capacidad de afectar los organismos que habitan en ellos (Yoshida *et al.*, 1999; Amoyaw-Osei, 2011; Stankovic y Stankovic, 2013; Wu *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2015; Chowdhury *et al.*, 2016).

Las comunidades marginadas en las zonas urbanas frecuentemente tienen acceso limitado a fuentes de agua de buena calidad. En algunos casos, las fuentes de abastecimiento están contaminadas o con concentraciones elevadas de elementos potencialmente tóxicos; como es el

caso de India, donde la concentración promedio de los metales Cr, Mn, Ni, Pb y Zn exceden las normas establecidas por la Organización Mundial de la Salud, OMS, (WHO, por sus siglas en inglés) (WHO, 2011, Chennaiaha *et al.*, 2014;).

La situación sobre la contaminación ambiental en México ha sido estudiada en las zonas industrializadas, en zonas con actividades ganaderas y agropecuarias del centro y norte del país. Por ejemplo, en el estado de Sonora, las actividades de la industria y la agricultura contaminan las fuentes de agua potable en esta zona. Los resultados de ciertos estudios señalaron pozos de agua y tanques de almacenamiento con niveles elevados de As, Cd, Cu, Hg y Pb, y que aproximadamente el 45 % de las muestras excedió la concentración de Pb con $15 \mu\text{g L}^{-1}$ y el 89 % de las muestras excedió el valor de referencia de As con $10 \mu\text{g L}^{-1}$ (Wyatt *et al.*, 1998; WHO, 2011; USEPA, 2015).

Un fenómeno actual de la contaminación ambiental por metales pesados es en los dos sitios agrícolas del centro de México (Mixquiahuala, Hidalgo y Tláhuac, México), donde los cultivos han sido regados durante 50 años con aguas residuales. Esta actividad antropogénica ha causado deterioro en zonas que fueron irrigadas durante largos periodos, y solo se pueden cultivar ciertas especies de plantas en estas zonas contaminadas. El grado de contaminación de ciertos metales, como Cu, Cr y Co en los suelos se encontró por encima de los límites máximos permisibles según las normas oficiales de México, que posiblemente puede causar problemas para la salud humana (Mireles *et al.*, 2004). En los vegetales, tubérculos y frutas cultivados sobre estos terrenos, se detectaron concentraciones elevadas de Mn y Zn. En el cultivo de alfalfa (*Medicago sativa L.*), cultivado en estos dos sitios, se detectaron concentraciones de hasta $247 \mu\text{g kg}^{-1}$ de Mn en los raíces, tallos y hojas del cultivo. Las concentraciones de Zn encontradas en los raíces, tallos y hojas de alfalfa fueron entre 83 y $585 \mu\text{g kg}^{-1}$.

En el río Tula (parte sur-central de Hidalgo) se encontraron concentraciones elevadas de Pb en los músculos de tilapia (*Oreochromis niloticus*). Los resultados obtenidos mostraron un efecto negativo de la presencia de los metales As, Cd y Pb en la columna de agua y sedimentos, en específico i) las altas concentraciones de Pb (valor promedio de $1.52 \mu\text{g kg}^{-1}$) y Cd (valor promedio $1.21 \mu\text{g kg}^{-1}$) en los músculos de tilapia significa, que es inseguro para el consumo humano, y ii) As, Cd y Pb se bioacumulan en nueve especies nativas de zooplancton y por su participación en la cadena trófica, afecta otras especies consumidoras de la misma (Rubio-Franchini *et al.*, 2015).

De los estudios para determinar la contaminación ambiental en la Laguna Ilusiones, Villahermosa (Tabasco), encontraron los metales Al, Cd, Cr, Mn, Ni, Pb y Zn en agua y sedimento. Los resultados obtenidos en agua varían en concentraciones, pero todos se encontraron por debajo de los límites de la NOM-001-SEMARNAT-1996 (SEMARNAT, 1996b). Sin embargo, el cociente de peligro (una división de la concentración de referencia y concentración media) para Cd y Cr es mayor a la unidad (>1), que se clasifica con riesgo potencial para la biota acuática. Las concentraciones en el sedimento de la Laguna de Ilusiones fueron también variables, las más bajas fueron de Cd y las más altas de Pb (204 mg kg^{-1}). En el caso de las concentraciones encontradas en el sedimento, el cociente de peligro es mayor >1 para todos los metales, excepto para Zn y el Mn. Se presume que la principal actividad responsable para la contaminación en la Laguna Ilusiones son las descargas de aguas residuales no reguladas de las industrias y la actividad agrícola, que aportan compuestos tóxicos y metales pesados (Flores *et al.*, 2018).

En el sistema lagunar de Tamiahua, Veracruz, se cuantificaron la concentración de los metales Cd, Pb y el metaloide As en las porciones gónada-sistema digestivo (GSD) y músculo-mantobranquias (MMB) de hembras y machos de ostión (*Crassostrea virginica*). La acumulación de metales pesados y el metaloide en ostión de lagunas del Golfo de México se debe principalmente a las descargas antropogénicas y actividades agropecuarias. En el tejido MMB se encontraron las concentraciones más altas de Cd, Pb y As, con valores medios de 11.77 ± 1.32 , 0.484 ± 0.08 y $4.02 \pm 0.56 \text{ mg kg}^{-1}$, donde el cadmio superó los límites permisibles, que establecen las normas sanitarias para el consumo de moluscos bivalvos (NOM-029-SSA1-1993), lo que representa un riesgo para la salud humana (Lango-Reynoso *et al.*, 2010). Gold-Bouchot *et al.*, (1995) cuantificaron las concentraciones de los metales Ba, Cd, Cr, Cu, Fe, Ni, V y Zn en el área de estudio la Laguna de Términos, México, en los tejidos de ostión americano (*C. virginica*). Los metales esenciales Cu, Fe y Zn demostraron las más elevadas concentraciones ($134.99\text{-}231.30 \text{ } \mu\text{g g}^{-1}$, $220.95\text{-}296.53 \text{ } \mu\text{g g}^{-1}$ y $327.16\text{-}514.97 \text{ } \mu\text{g g}^{-1}$), con una distribución similar en las cinco estaciones de muestreo.

Las referencias de SQuiRTs (Screening Quick References Tables), que establece los valores de referencia de contaminación por compuestos inorgánicos (incluyendo metales) y la guía provisional de calidad de sedimento (por sus siglas en inglés, *Interim Sediment Quality Guideline*) se representan en la Tabla 1, que es funcional en la evaluación de la situación de la contaminación ambiental por metales en sedimentos.

Tabla 1. Las referencias de SQuiRTs para metales en sedimentos establecidos (Buchman, 2008) y canadiense (ISQG- *Interim Sediment Quality Guideline*), y niveles de fondo de referencia para Estados Unidos TEL-Nivel de Efecto Tóxico (por sus siglas en inglés, Toxic Effect Level). Concentraciones expresadas en partes por billón (ppb).

	Al	Ba	B	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
SQuiRTs	-	0.7	-	10.0	7.0-13.0	10.0-25.0	-	400.0	9.9	4.0-17.0	7.0-38.0
ISQG	-	-	-	-	37.3	35.7	-	-	-	35.0	123.0
TEL	-	-	-	-	37.3	35.7	-	-	18.0	35.0	123.0

(Modificado de Liano-Guanes *et al.*, 2015)

1.4 Contaminación ambiental por metales en la península de Yucatán.

En la zona cañera de la cuenca del río Hondo, sur del estado de Quintana Roo, cuatro metales pesados (Cd, Cu, Hg y Fe) fueron analizados en los sedimentos durante el periodo de sequía (febrero-abril; Tun-Canto *et al.*, 2017). Los valores promedios en las muestras de sedimentos para los metales Fe, Cu, Cd y Hg fueron 19,952.68, 8.00, 0.54 y 0.06 mg kg⁻¹, respectivamente. Se asume que la presencia de los metales pesados en esta zona de estudio tiene su origen en actividades agroindustriales (fertilización y aplicación de agroquímicos). El metal Fe existe naturalmente en el área y su movilidad ha sido influenciada por la intensidad de actividades agrícolas en esta región.

En la bahía de Chetumal (Quintana Roo) se realizaron estudios para evaluar los metales pesados en sedimentos en el año 2004, en la temporada de sequía (febrero-abril) y lluvias (septiembre-noviembre). Se analizaron las concentraciones de metales que provienen de la contaminación de descargas de aguas residuales de distintas fuentes y terminan en la bahía. Los contenidos de Cd, Pb, Hg y As encontrados en sedimento reportaron valores muy elevados de acuerdo a la toxicidad de estos metales, que fueron: 1.00, 5.63, 2.25, y 0.63 g g⁻¹, respectivamente. La época donde se mostraron estas elevadas concentraciones fue durante la temporada de lluvia, posiblemente por el fenómeno de escurrimiento de aguas pluviales y la mezcla de material suspendido en la columna de agua con la lluvia, que después son transportadas a estos sitios (González-Bucio *et al.*, 2008).

En otras regiones de la península de Yucatán se realizaron varios estudios con respecto a la contaminación ambiental por metales con un impacto importante sobre la salud humana y el

ambiente. En la zona urbana de Mérida (Yucatán) se analizaron la concentración de elementos trazas, As, Cr y Hg en la sangre y orina de 33 niños. El estudio registró, que, para el As, 37 % de las pruebas de sangre sobrepasan los límites permisibles de la Organización Mundial de Salud (OMS), que se atribuye principalmente al consumo de pollo contaminado con compuestos órgano-arsénicos. En el mismo estudio de los 65% muestras de agua analizadas, 28 % de orina y 12 % de sangre excedieron los límites de la OMS (Arcega-Cabrera *et al.*, 2018).

El humedal protegido de El Palmar, ubicado en el noroeste de Yucatán, se realizó una investigación para determinar la concentración de Pb en una zona caracterizada por alta frecuencia de cacería. El Palmar es importante como hábitat de varias especies lacustres y bénticas, además genera ingresos para el ecoturismo, en específico, turismo de observación de aves migratorias. Los resultados de los análisis de suelo mostraron que la concentración de Pb varía por debajo del mínimo nivel de efecto de fauna ($30.24 \mu\text{g g}^{-1}$), antes de la temporada de caza hasta una concentración aproximada al nivel de efecto probable de fauna ($112.18 \mu\text{g g}^{-1}$), posterior de la temporada de caza. Se obtuvieron concentraciones de plomo más bajas de las que se esperarían, probablemente por de la degradación de la munición en una fase soluble o formas partículas, y la ingesta de la munición por especies bénticos y lacustres (Arcega- Cabrera *et al.*, 2013).

En la laguna Chelem (Yucatán), se investigó el impacto de los factores geoquímicos y ambientales sobre la variación estacional de metales en la laguna. La variación espacial y temporal señaló que la concentración de los metales pesados Cd, Cu, Cr y Pb fue significativa. Para As, Cd y Sn la concentración fue 12 veces mayor que las referencias de SQuiRTs (Buchman, 2008). Los resultados sugieren que el acuífero transporta metales largas distancias y éstos se depositan en la laguna una vez que son descargados con el agua (Arcega-Cabrera *et al.*, 2015).

El proceso de urbanización contamina el acuífero, que es la fuente mayor de agua potable para la población en la península de Yucatán. La urbanización, similar a la actividad industrial, constantemente aporta nuevas fuentes de contaminantes, por lo que es necesario analizar su toxicidad, persistencia y bioacumulación (Aguilera *et al.*, 2018). La urbanización alrededor de cuerpos de agua, ha incrementado significativamente afectando la calidad de agua, biota y la salud humana (Gold-Bouchot y Zapata, 1995; Herrera-Silveira, 2006; Arcega-Cabrera *et al.*, 2015). Las actividades antropogénicas en la costa de la península de Yucatán varían de pesquería, extracción de sal, desarrollo portuario, turismo de alto y bajo impacto con la potencia de impactar las lagunas costeras disminuyendo la diversidad de hábitat y especies.

Simultáneamente, con la urbanización ha aumentado el tráfico vehicular, que produce una mayor cantidad de polvo urbano con componentes peligrosos, y la presencia del polvo urbano en la atmosfera, se relaciona con problemas a la salud humana (Zapata-Carbonell *et al.*, 2017). El polvo urbano se define como una mezcla heterogénea compuesta por emisiones relacionadas con la combustión, abrasión de frenos y partículas de desgaste de neumáticos (Adachi y Tainosho, 2004; Aguilera *et al.*, 2018), la intemperización de la pintura, emisiones industriales (Al-Khashman, 2004; Morales *et al.*, 2014) y otros elementos que pueden ser suspendidos y transportados por las corrientes de aire para asentarse y mezclarse con el suelo (Cortés *et al.*, 2015; Sánchez *et al.*, 2015).

La ciudad de Cancún, situada en el municipio de Benito Juárez, estado de Quintana Roo, es considerada como zona urbana grande, con un impacto alto sobre lagunas adyacentes (Nichupté, Bojórquez), otras lagunas como Chacmochuch que están situadas lejos de la zona urbana registran presencia de contaminantes, debido al incremento de las descargas de aguas domésticas y la acumulación de residuos sólidos con elementos metálicos (Herrera-Silveira y Morales-Ojeda, 2018). En el caso de Laguna Manatí, se piensa que la contaminación en el agua es debido a las descargas de aguas domesticas no tratadas y drenaje pluvial, enriquecidas con residuos de metales que provienen de la construcción, talleres mecánicos o unidades de reparación de motores de combustión, y la lixiviación de los residuos de aparatos electrodomésticos, principalmente aportados por la urbanización de la colonia Vicente Lombardo Toledano y las vías de acceso hacia el norte del municipio de Isla Mujeres en su sección continental (Barrios, 2019; SEDESOL, 2012).

A partir de los años 70-80's del siglo XX, el estado Quintana Roo registro una tasa de crecimiento de 14.2 % con una población total de 443 277 personas (INEGI, 1990; Villanueva, 1998), actualmente la tasa registrada es 4.1 % por año y la población total es de 1 857 985 personas (INEGI, 2020). El sector turismo es de suma importancia económica para el estado. Estas actividades pueden generar aumento de los contaminantes tóxicos en los ecosistemas acuáticos, por el aumento de las descargas residuales y el incremento de residuos provenientes de actividades recreativa del sector turístico (Wang *et al.*, 2015; Polanco- Rodríguez, 2017). Otro aspecto del incremento de concentraciones de metales pesados es el incremento de lixiviados y contaminantes, causado por el aumento de la acumulación de residuos electrodomésticos en sus alrededores (Calderón-Maya *et al.*, 2014; Barrios, 2019).

En la zona urbana de Benito Juárez, se considera a las descargas de aguas residuales y pluviales como principal fuente de contaminación a los sistemas acuáticos del sistema Lagunar de Nichupté- Bojórquez, también los hidrocarburos de los combustibles que llegan a los cuerpos de agua por el aumento del tráfico vehicular, los derrames de aceites y lubricantes proveniente de actividades de recreación de turismo, y por último la lixiviación de residuos de aparatos electrodomésticos o descargas de fosas sépticas (Hita- González, 2000; Carbajal, 2009).

Sternbeck y colaboradores (2002) señalaron una lista de metales (Ba, Cd, Cu, Pb, Sb y Zn) que provienen principalmente de la quema de combustibles del tráfico vehicular; concluyeron que estos metales son transportados como partículas suspendidas y pueden terminar en los sistemas acuáticos y finalmente precipitarse a los sedimentos de estos sistemas. El tráfico vehicular emite grandes cantidades de monóxido de carbono, óxido de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles, que tiene adversos impactos sobre la vegetación (Ruiz-Sandoval, 1997). Según la SEMARNAT (2012), existe interacción dinámica entre los ambientes terrestres y oceánicos, que alternan los procesos geomorfológicos de los sistemas hídricos. El efecto de la zona urbana (en específico la colonia Vicente Lombardo Toledano) sobre la Laguna Manatí, se debe principalmente a la expansión de la urbanización y dos vías de elevado tráfico vehicular (Avenida Bonampak y Avenida José López Portillo), que aislaron la Laguna Manatí, reduciendo su comunicación con la Laguna Chacmochuch. Con la pérdida de la conectividad hidrológica, la Laguna Manatí al largo plazo puede perder servicios ecosistémicos esenciales de que los pobladores en sus alrededores aprovechaban. La posible contaminación en el sistema lagunar de Chacmochuch, ubicado en la zona continental entre Cancún e Isla Mujeres, se relaciona con los lixiviados provenientes del relleno sanitario ya clausurado. En el caso de Laguna Manatí, se piensa que la contaminación en el agua es debido a las descargas de la zona urbana que la rodea, principalmente de la colonia Vicente Lombardo Toledano, así como por la acumulación de basura de los antiguos electrodomésticos (SEDESOL, 2012).

La Laguna Manatí es un sitio importante debido a su ubicación, del cual las comunidades urbanas aprovechan de sus servicios ecosistémicos (DOF, 1999; IBANQROO, 1999). Los manglares también son el hábitat acuático de una gran diversidad de microorganismos como las microalgas, fitoplancton, zooplancton. La destrucción de los manglares en el estado ocasiona la pérdida de los servicios ambientales que los manglares proveen y, además, las perspectivas de crecimiento demográfico y económico impulsado por la industria turística ha traído consigo una creciente generación de aguas residuales y desechos sólidos.

Según estudios realizados por Villanueva y Botello (1992), las concentraciones de metales pesados en la laguna Nichupté son bajas debido a la ausencia de la actividad industrial u otras actividades capaces de aportar los metales tóxicos. Datos no publicados de Alvarado-Flores, registraron en 2018, un total de 19 metales para el estado de Quintana Roo, donde el Pb fue encontrado con más frecuencia, seguido por el Cd. El Cd se encontró varias veces en los sistemas hídricos por estudios realizados por Polanco-Rodríguez, (2017). Alvarado-Flores y Rubio Franchini (datos no publicados), encontraron el Cd entre concentraciones de 0.01 a 4.6 $\mu\text{g L}^{-1}$ en la zona costera de Quintana Roo. En la península de Yucatán los estudios de Marín *et al.*, (2000) registraron una concentración de 0.01 $\mu\text{g L}^{-1}$, y Graniel-Castro *et al.*, (2008), una concentración de 85 $\mu\text{g L}^{-1}$. Se asume que la contaminación ambiental por metales pesados en los ecosistemas acuáticos en Quintana Roo son debido a las descargas de las aguas residuales mal tratadas y la lixiviación proveniente de la acumulación de basura alrededor de los cuerpos de agua (Jiménez-Cisneros, 2005), que contienen metales que afectan los organismos y su hábitat acuático (Medina-González *et al.*, 2004).

. Las tres medidas al nivel municipal que se recomienda para garantizar la calidad y caudal de los manantiales son 1) la zonificación de los terrenos con el fin de establecer el uso sostenible de suelo alrededor del sistema lagunar, 2) la reubicación de pozos de absorción de efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales hacia sitios cercanos a la línea costera para la disposición final, dilución de efluentes en agua salina y evitar su dispersión en el acuífero subterráneo, 3) y la modelación del funcionamiento de los pozos de absorción con proyecciones al futuro de la expansión en la zona urbana esperada, para obtener el conocimiento sobre el grado del impacto de los efluentes tratados en sistemas kársticos y los aportes de elementos metálicos a los cuerpos de agua superficiales (Hita- González, 2000).

Es muy importante mencionar que el estado de Quintana Roo no cuenta con ríos, que en la mayoría de los casos funciona como receptores de las aguas residuales no tratadas. El 91% de la zona cuenta con sistema de alcantarillado, pero 9% de la población carece los servicios públicos de drenaje y suministro de agua potable (CONAGUA, 2015). Los asentamientos irregulares, con una estimación de 140,000 viviendas sin servicios públicos en Cancún, forman otro problema por la selección de estas personas en construcciones de fosas sépticas mal diseñadas (FONATUR, 2014). El problema de la calidad de agua del estado de Quintana Roo, es la contaminación del agua generada por la urbanización y la actividad turística, la mala construcción e inadecuado uso de fosas sépticas, vertimiento de aguas residuales no tratadas o la conexión directa del drenaje al acuífero o cuerpos de agua superficiales, y actualmente la

acumulación de la basura de electrodomésticos, entre otros factores. Por estos factores anteriormente mencionados, es necesario desarrollar estrategias para monitorear la calidad del agua y los contaminantes, en específico los metales pesados aportados a los sistemas acuáticos (Foster *et al.*, 2002; Barrios, 2019).

El sedimento de los sistemas acuáticos, que es el hábitat de varias especies, recibe por vía natural o actividades antropogénicas, sustancias metálicas que, por su estado de oxidación, se pueden volver móviles o inmóviles en el medio biofísico (Madureira *et al.*, 2013). Mediante métodos analíticos, se logra determinar la concentración de los metales pesados en sedimentos, que nos brinda información sobre la condición del sistema y posibles efectos a organismos acuáticos (Gutiérrez-Galindo *et al.*, 1999). Debido a la conectividad hidrológica que existe entre cuerpos de agua en la zona costera, la presencia de elevadas concentraciones de metales pesados causaría alteraciones en la vida acuática e implicaciones ecológicas (Macías-Richard y Pérez Aguilar, 2009). Una situación como esta puede presentarse en la Laguna Manatí, debido a que la urbanización ha aumentado significativamente los vertimientos de las aguas residuales no tratadas y la acumulación de basura electrónica. Aunque no existen datos de cuales metal(oid)es están presentes, tenemos que tomar en cuenta que estas acciones humanas son peligrosas para el ecosistema.

Para la conservación del medio biofísico de la Laguna Manatí, declarado como área natural protegida, es necesario implementar una estricta aplicación de leyes y legislaciones ambientales como adecuada planificación de proyectos de construcción en la zona urbana alrededor del sistema acuático, conservación de la biodiversidad, prohibir la deforestación, establecer regiones de zonificación para el eficiente uso de los terrenos y promover programas turísticos con el enfoque de conservar la naturaleza. Es necesario realizar estas medidas para evitar que la contaminación alcanza a un grado de riesgo ambiental y de salud alto y afectar la actividad socioeconómica y la recreación de la sociedad (Padilla, 2015).

La estimación de la recolección de basura clandestina después de una campaña de limpieza en Laguna Manatí fue aproximadamente de 5 toneladas (febrero de 2021, SEMA, *com. pers.*). El registro después de esta campaña de limpieza registró basura electrodoméstica, partes de televisores y antiguos refrigeradores. En Latinoamérica y el Caribe, los equipos de computación representan una gran fracción de los Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAAEs, Steubing, 2007). Las empresas ocupan un importante papel en la generación de los residuos de computación, responsable por un 55%, seguidos por los hogares 35% y las instituciones

gubernamentales con un 10 % (Boeni *et al.*, 2008). Debido a la gran cantidad de hoteles, podemos suponer que son los de mayor contribución en esta región. Entre la basura electrodoméstica con alta frecuencia se encuentran congeladores, equipos de sonido, televisores, microondas, estufas. De igual manera en el área de estudio tenemos que considerar los residuos que provienen de los talleres mecánicos (aceites, lubricantes, baterías de coches), derrames de unidades reparación de motores de combustión como aportadores de metales pesados o metaloides al ambiente (Padilla, 2015). El impacto negativo de la urbanización es el aumento de actividades humanas en el entorno de los sistemas acuáticos del estado de Quintana Roo, en específico la Laguna Manatí, que ha resultado en la acumulación de basura que llega al medio biofísico, y potencialmente forma un peligro ambiental y sobre la salud humana.

1.5 Zooplancton como bioindicador de la presencia de metales.

En las últimas décadas se ha incrementado el interés del uso de bioindicadores como herramienta para evaluar la contaminación ambiental por metales. Varios organismos como hongos, bacterias, algas, plancton, insectos, moluscos, plantas, aves e incluso humanos se han utilizado para monitorear los cambios de los metales en el aire, agua, sedimentos, suelo y la cadena trófica (Lam y Wang, 2008; Zhou *et al.*, 2008; Hargreaves *et al.*, 2011; Joksimovic *et al.*, 2011; Jovic *et al.*, 2011; Kitowski *et al.*, 2012; Markovic *et al.*, 2012; Stankovic *et al.*, 2013). En la Laguna Manatí, es necesario conocer mediante la cuantificación directa, las concentraciones de los metales en agua, sedimento y en los organismos zooplanctónicos (rotíferos, copépodos, cladóceros u ostrácodos) ya que se puede afectar la calidad de vida de los pobladores mediante la extracción de organismos acuáticos como fuente de proteína y el uso recreativo (Jovic *et al.*, 2012; Stankovic *et al.*, 2013).

El zooplancton se define como organismos microscópicos unicelulares con un tamaño inferior a 1 mm hasta organismos pluricelulares con un tamaño hasta 200 mm, que se encuentran en los ecosistemas acuáticos (Tobías- Lagos *et al.*, 2014), además dependiendo de su hábitat son herbívoros, carnívoros u omnívoros (Chavance, 2012).

Los rotíferos, que son organismos pseudocelomados de tamaño microscópico, con una representación de 2030 especies, habitan en ambientes marinos y dulces, y su tamaño oscila entre 50-2000 μm en longitud (Walker, 1981). Son filtradores, que se alimentan de algas unicelulares, bacterias y materia orgánica suspendida (detritus). En las últimas tres décadas la atención de los investigadores ha ido ampliándose con rotíferos, en específico, los estudios de

distribución espacial y temporal, y con la investigación de los mecanismos fisiológicos y genéticos, que explican los patrones ecológicos. Los individuos del género *Brachionus sp.*, son excelentes bioindicadores para mostrar el efecto adverso por la presencia de concentraciones de metales en un ambiente determinado, por su gran respuesta a metales, y su alta sensibilidad a las sustancias tóxicas de elementos metálicos (Shuhaimi-Othman *et al.*, 2001). El género de los Lecanes se encuentra ampliamente distribuido en ambientes dulceacuícolas y marinos (Segers, 1995), varían de tamaños pequeños a mediano, y tienen una importancia con respecto a la calidad del medio ambiente. Todas las especies principalmente viven en hábitats litorales, pero también ocurren en vegetación flotante y sumergida (Koste y Shiel, 1990; Kuczynska-Kippen, 2007). *Lecane* es probablemente uno de los géneros de rotíferos más diversos en el trópico, con alrededor de 200 especies validas en el mundo (Segers & Savatentalinton, 2010).

Los cladóceros son micro-crustáceos con un tamaño, que varía desde 1.0- 2.0 mm, como los cladóceros; *Pseudosida cf. szalayii*, Daday 1898; *Simocephalus congener*, Koch 1841, *Moinodaphnia macleayi*, King 1853, u además existen individuos mayores a 2.0 mm, por ejemplo, *Sida ortiva* Korovchinsky, 1979, (Kotov *et al.*, 2012). Los cladóceros son comunes en los cuerpos de agua en todos los sistemas epicontinentales. Son individuos filtradores, se alimentan de microalgas, bacterias y materia orgánica. Su reproducción es principalmente asexual por partenogénesis (Rodríguez *et al.*, 2003; Santos *et al.*, 2006). Además, son considerados buenos bioindicadores ante efectos de metales por ser organismos heterótrofos importantes para la transferencia de materia y energía en el ecosistema (Pérez-Legaspi *et al.*, 2015). Las especies nativas frecuentemente utilizadas para evaluar la toxicidad de sustancias tóxicas en los medios ambientes son: *Macrothrix triserialeis*, *Alona glabra* Sars, *Camptocercus sp.*, *Ceriodaphnia dubia* Richard, *Daphnia obtuse* Kurz, *Diaphanosoma sp.*, *Dunhevdia odontopax* Sars, *Echinisca elegans* (Sars), *Pleuroxus similis* Vávra (Sarma y Nandini, 2006; Pérez-Legaspi *et al.*, 2015).

Los copépodos son micro-crustáceos, con un tamaño que varía de 0.5-3 mm de longitud, y habitan en todos los sistemas acuáticos del mundo. Se presentan formas planctónicas, bentónicas y asociaciones con otros organismos, desde comensales a parásitos. La comunidad de copépodos se puede usar como indicación de perturbaciones en los medios acuáticos, de hecho, los copépodos se han usado como bioindicadores de la calidad de las aguas, y en pruebas de toxicológicas (Miracle, 2015).

Los ostrácodos son crustáceos pequeños, con un tamaño que varía entre 0.5 hasta 3.0 mm, y su cuerpo está encerrado completamente dentro de un caparazón (o concha), donde las dos valvas

de carbonato de calcio, se mantienen unidas por la parte dorsal. La estructura del caparazón calcáreo se puede analizar en la cuantificación de elementos trazas o metales pesados, donde en muchas investigaciones esta información puede servir para determinar la datación geológica (Palacios-Fest *et al.*, 2011). Según Holmes (2001), estos organismos presentan un reproducción sexual, partenogenética o mixta, lo que resulta en alta dispersión, diversificación y adaptación sobre el planeta. Se utilizan las especies de ostrácodos *Diaphanocypris meridana*, *Cypridopsis vidua* como bioindicadores para determinar la contaminación por metales pesados, debido a su alta sensibilidad a cambios físico-químicos en la naturaleza (Prudêncio *et al.*, 2007).

1.6 Factores de bioconcentración, bioacumulación y biodisponibilidad.

La bioconcentración se define como el proceso, donde el organismo absorbe una sustancia química del medio ambiente a través de las superficies respiratorias y dérmicas, es decir, la exposición química por la dieta no se incluye. Además, la bioconcentración es el resultado neto de las tarifas competitivas de la captación química, por las superficies respiratorias, por ejemplo, las branquias de peces, y eliminación química incluyendo el intercambio respiratorio, egestión fecal, biotransformación metabólica del compuesto padre, y dilución por el crecimiento. La dilución por el crecimiento se considera como el proceso de eliminación no real, ya que el compuesto químico no se elimina actualmente por el organismo; sin embargo, la concentración puede ser diluida, por el aumento del tejido. El grado a la que ocurre la bioconcentración se expresa con el factor de bioconcentración (BCF), y se determina bajo condiciones controladas del laboratorio, en el que se excluye deliberadamente la ingesta dietética. La captación por varias vías y los procesos de eliminación, resultando en bioconcentración se expresa matemáticamente con la formula;

$$FBC \text{ o } FB = \frac{CB}{CWD} = \frac{k1}{k2+Ke+Km+Kg} \quad (\text{Ecuación 1})$$

CB = Concentración de la sustancia química en el organismo

CWD = Concentración de la sustancia química en el agua

k1 = constante de la captación química

k2 = constante de la eliminación del químico por vía respiratoria

Ke = constante de la eliminación del químico por egestión fecal

Km = constante de la eliminación del químico por biotransformación metabólica

Kg = constante de la eliminación del químico por dilución de crecimiento

La bioacumulación se define como el proceso donde la sustancia química se absorbe en el organismo por todas las rutas de exposición; es decir, fuentes dietéticas y entorno ambiental. Además, la bioacumulación es el resultado neto de los procesos competitivos de la captación química en el organismo por vía respiratoria, la dieta, por la eliminación química por el organismo, donde se incluye el intercambio respiratorio, egestión fecal, biotransformación metabólica de la compuesta padre y dilución de crecimiento.

La absorción competitiva y los procesos de eliminación resultando en la bioacumulación, se representa matemáticamente con la formula

$$FBA = \frac{CB}{CWD} = \frac{\{k1+kD(\frac{CB}{CWD})\}}{k2+Ke+Km+Kg} \quad (\text{Ecuación 2})$$

CB = Concentración de la sustancia química en el organismo

CWD = Concentración de la sustancia química en el agua

k1 = constante de la captación química

k2 = constante de la eliminación del químico por vía respiratoria

kD = constante de captación por la dieta

Ke = constante de la eliminación del químico por egestión fecal

Km = constante de la eliminación del químico por biotransformación metabólica

Kg = constante de la eliminación del químico por dilución de crecimiento

(Arnot y Gobas, 2006; De Forest et al., 2007; Walker et al., 2012)

En los sistemas acuáticos del noreste de Quintana Roo, Alvarado-Flores *et al.*, (2019), analizaron la bioacumulación de metales tóxicos en las estructuras externas de diatomeas, dinoflagelados, rotíferos, cladóceros, copépodos y escamas de peces. La biodisponibilidad de metales pesados en el organismo depende de factores físicos como la temperatura, tendencia de formar asociaciones con sustancias minerales u orgánicas (Förstner y Wittmann, 1981; Dekov *et al.*, 1998), adsorción y secuestro, así como de factores químicos como la solubilidad de los lípidos, el coeficiente de repartición n-octanol-agua (K_{ow}), y de factores biológicos como las interacciones tróficas, adaptación bioquímica y fisiológica (Verkleji, 1993; Hamelink *et al.*, 1994). Cuando el metal entra el organismo, tiene el potencial de acumularse y si la cantidad del tóxico en el organismo no se reduce por la excreción, puede exceder los límites de asimilación del organismo, lo que resulta en un peligro para el organismo. Cuando se bioacumula el metal en el organismo

puede ser disponible o no, y participar en procesos metabólicos, provocando efectos adversos y perjudiciales (Rainbow y Luoma, 2011).

1.7 Evaluación de riesgo ambiental.

El análisis del riesgo ambiental tiene como objetivo obtener respuestas e información precisa para estimar y evaluar la probabilidad y magnitud del riesgo que posee una actividad antropogénica, una sustancia tóxica adversa para varios organismos, una población, un ecosistema y/o la salud humana (Peña *et al.*, 2001). Existen varias formas de obtener estos índices; uno de ellos, es la valoración del riesgo ambiental mediante los métodos de Karlsson (2008), determinada por la relación de la concentración ambiental media (MEC) y la concentración predictiva sin efecto tóxico (PNEC, Román *et al.*, 1999; Scheringer *et al.*, 2001). Al contar con ambas variables, es posible valorar el riesgo ambiental y concluir de ello que, si los valores de MEC exceden los límites máximos permisibles, puede ser considerado como un riesgo para la salud o la vida acuática según corresponda con la legislación de referencia. Además, para determinar la magnitud del riesgo ambiental que presentan estas concentraciones de metales cuantificados, es importante determinar o conocer los valores PNEC del metal de estudio sobre los organismos indicadores o nativos de la región de estudio. Estos valores se determinan por la división de un parámetro toxicológico importante, la concentración letal 50 (CL₅₀) el cual se divide entre un factor de la valoración del riesgo (Risk Assessment Factor RAF), que acorde a Karlsson (2008), oscilan entre 10 y 1000, y dependerán de la cantidad de información toxicológica que se cuente de especies indicadoras y niveles tróficos. También se puede estimar el riesgo ambiental mediante índices de acumulación o enriquecimiento de metales en los sedimentos comparados con las concentraciones basales del suelo. Todos ellos nos permiten identificar si las concentraciones cuantificadas de los metales son superiores a los niveles naturales y si representan potencial riesgo ecológico.

La presente investigación realizó una evaluación de riesgo ambiental de la Laguna Manatí (Quintana Roo) debido a su aprovechamiento como abastecimiento de proteína mediante la pesca y el uso del cuerpo de agua para realizar actividades recreativas. Por el aumento de actividades antropogénicas y la urbanización, se asume que incrementó la descarga de aguas residuales y pluviales, así como acumulación de basura (artículos electrodomésticos) con elementos metálicos, que potencialmente afectan de forma negativa la Laguna Manatí. El basurero de artículos electrodomésticos no regulado en el norte de Laguna Manatí atrajo grandes cantidades de recuperadores de materiales que desarmaban los aparatos viejos para extraer el

cobre y otros metales, y quemaban la basura dentro de la reserva Laguna Manatí (Barrios, 2019), lo que incrementa el peligro de contaminación por metales en la zona. Es por ello, que la estimación de riesgo ambiental realizada en esta zona es importante riesgos ambientales y a la salud.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

El valor de los ecosistemas acuáticos está en que brindan bienes y servicios ecosistémicos a nivel global. El agua de lagunas costeras ofrece varios beneficios a la sociedad, por ejemplo, es sitio de crianza, reproducción y anidación de organismos, atracción para actividades turísticas y de esparcimiento, fuente de generación de bienes de consumo, entre otros. En México, las áreas naturales protegidas actualmente representan una zona específica para la protección de las especies, y promueven el desarrollo sustentable de las comunidades que se encuentran en estas zonas (CONANP, 2014). La zona sujeta a conservación Laguna Manatí (parte del Sistema Lagunar de Chacmochuch), compuesta por manglares, zonas inundables, selva baja caducifolia y vegetación de dunas costeras (SEDESOL, 2012) es sumamente relevante como zona de conservación dentro de la mancha urbana del municipio de Benito Juárez.

La ciudad de Cancún tiene riesgo de contaminación del acuífero por lixiviados debido a las características permeables del suelo y la roca. En el caso de Laguna Manatí, se pueden originar en el relleno sanitario (ubicado al poniente de la Laguna Manatí) y por la acumulación de los residuos electrodomésticos en terreno abierto, descargas de agua residual no tratada, que provienen principalmente de los asentamientos humanos. Además, hay aumento de actividades antropogénicas en las áreas naturales protegidas por la frecuente visita de personas, lo que han incrementado la posibilidad de entrada de sustancias potencialmente tóxicas (SEDATU, 2013).

Debemos tomar en cuenta que la urbanización en zonas alrededor de la Laguna Manatí afecta directamente a la laguna por la entrada de drenaje pluvial. Particularmente, la Calle 16 (al noreste de la colonia Lombardo Toledano), registra una mayor vulnerabilidad por afectaciones de lluvias inusuales, especialmente durante los meses de los huracanes o tormentas tropicales. La solución adecuada es diseñar e implementar un drenaje para la colección de agua pluvial, donde el escurrimiento será transportado por colectores, tratados en cárcamos y, según las normas establecidas, descargar a los cuerpos receptores (Llaguna-Guilberto *et al.*, 2016).

Muy probablemente la construcción de viviendas y el establecimiento de talleres mecánicos o unidades de reparación de motores de combustión en la proximidad de Laguna Manatí, aportan partículas o sustancias con metales al sistema de drenaje o escorrentía pluvial, que son los factores causantes de la contaminación ambiental con posibles riesgos al ecosistema y la salud humana. Debido a que los pobladores utilizan la Laguna Manatí como fuente de proteína y como lugar de recreación, es recomendable conservar el medio ambiente y monitorear los agentes tóxicos como los metales pesados, para determinar sus concentraciones y tomar medidas si excede los límites máximos permisibles de las normas oficiales mexicanas. Es deseable caracterizar las acciones antropogénicas que aportan los metales al medio, y si su presencia y concentración se puede originar por el polvo urbano del tráfico vehicular, descargas de aguas domésticas y de la actividad de recuperación de residuos que queman los remanentes de electrodomésticos en su búsqueda de metales para el reciclaje.

JUSTIFICACIÓN.

En México, las zonas kársticas representan el 20% de la superficie del país (Gutiérrez, 2008), en las cuales, actividades antropogénicas y naturales pueden influir en la calidad del agua subterránea y en la biota del lugar. Laguna Manatí es un área natural que presenta organismos acuáticos esenciales en la red trófica, brindan servicios ecosistémicos y genera ingresos y bienes a la sociedad. Sin embargo, la acumulación de residuos electrodomésticos, la escorrentía pluvial y el vertimiento de aguas residuales a los sistemas acuáticos, han aumentado con el crecimiento de la zona urbana, lo cual resulta en el ingreso de contaminantes en las áreas naturales protegidas. En consecuencia, es necesario conocer la concentración de sustancias tóxicas, en específico metales pesados o metaloides, ya que hay antecedentes de su presencia en los sistemas acuáticos de la región, y reportes de bioacumulación en la biota. Recientes reportes de los ecosistemas acuáticos de la península de Yucatán, documentan la presencia de metales pesados en la biota acuática. No existen datos sobre la presencia de metales pesados en la Laguna Manatí, y el impacto de estos metales con respecto a la biota y la cadena trófica. Es importante determinar la concentración de estos metales pesados en agua, sedimento y biota acuática, que nos brindará información indispensable e indicará el posible impacto sobre el ecosistema y la salud humana en este estudio de caso.

Por lo anterior, es importante realizar un análisis de riesgo en este ecosistema y se plantea en cuatro etapas: 1) detectar la presencia, cuantificar y analizar la toxicidad de metales pesados y metaloides en agua y especies indicadoras para estimar el riesgo potencial a la vida acuática, 2)

conocer si la concentración de los metales es mayor a lo que establece la Norma Oficial Mexicana y Normas Internacionales de Metales Pesados vigente 3) evidenciar si hay existencia de biomagnificación en los organismos analizados con los factores de bioacumulación y 4) estimar el riesgo ambiental mediante el uso de índices como los factores de enriquecimiento (*FE*), los índices de geoacumulación (*Igeo*) y el riesgo ecológico potencial (RI).

PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

- 1) ¿En qué matriz ambiental (agua y sedimento) o especie de organismo zooplanctónico se presenta una mayor acumulación de metales pesados o metaloides?
- 2) ¿Existe bioacumulación y/o biomagnificación en la biota acuática (rotíferos, copépodos, cladóceros u ostrácodos) encontrada en el área de estudio, Laguna Manatí?
- 3) ¿Cuál es el grado de la contaminación ambiental basado en la clasificación de enriquecimiento y geoacumulación en el sedimento?

HIPÓTESIS.

1. La concentración de metales pesados en agua, sedimento y zooplancton será mayor a los límites máximos permisibles para metales en agua establecidos en la normativa mexicana, los valores de referencias de SQiRTs (Buchman 2008), y las referencias internacionales de Canadá (CSQGs) y de Estados Unidos (LEL-NJ-DEP), a consecuencia de las descargas de aguas residuales no regulada, y los lixiviados generados por aparatos electrónicos depositados alrededor de la Laguna Manatí.
2. El grado de contaminación ambiental por metales determinado por los factores de enriquecimiento (*FE*) y los índices de geoacumulación (*Igeo*) serán mayores en el canal de drenaje que en el resto de la laguna, representando mayor riesgo ambiental por impacto directo de actividades antropogénicas y entrada de drenaje pluvial.

OBJETIVO GENERAL.

Cuantificar los metales en agua, sedimento y zooplancton (rotíferos, copépodos, cladóceros y ostrácodos), para determinar el riesgo ecológico en la Laguna Manatí por contaminación por metales.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

1. Cuantificar metales pesados en agua, sedimentos, y zooplancton (rotíferos, copépodos, cladóceros y ostrácodos) de la Laguna Manatí.
2. Demostrar mediante la cuantificación de metales en agua y los valores de toxicidad, si existe evidencia de factores de bioacumulación de metales en biota acuática (rotíferos, copépodos, cladóceros y ostrácodos) de Laguna Manatí.
3. Determinar los factores de enriquecimiento y los índices de geoacumulación, que resulta en el análisis del grado de contaminación ambiental de la Laguna Manatí.
4. Evaluar el riesgo ambiental por metales pesados en las matrices ambientales seleccionadas para el estudio en Laguna Manatí.

CAPITULO 2 MATERIALES Y MÉTODOS.

2.1 Descripción del área de estudio.

La península de Yucatán es caracterizada como una formación geológica kárstica de Centro América y el Caribe. Su estructura geológica está constituida por rocas carbonatadas y evaporíticas con una superficie de 165 000 km² aproximadamente, que incluye los estados Quintana Roo, Yucatán y Campeche (Perry *et al.*, 2002; Graniel-Castro y García-Gil, 2010). La estructura geológica kárstica es permeable y consiste de rocas del Pleistoceno y Terciario (Andrade-Gómez *et al.*, 2019). El acuífero Yucatán Norte, se ubica en la región hidrológica No. 32, de la Península Yucatán, con una extensión de 58 mil 135 km² (CONAGUA, 2016). La mayoría del abastecimiento de agua potable para la población y turismo viene de este acuífero (Llamas *et al.*, 1976; Schiller *et al.*, 2016). Ecológicamente, este acuífero es importante por su conectividad hidrológica e interacción con varias regiones de la península como sistemas acuáticos superficiales en ecosistemas terrestres y costeros, incluyendo humedales (CONANP, 2014) y el sistema Arrecifal Mesoamericano (Rodríguez-Zaragoza *et al.*, 2015).

El clima del estado Quintana Roo, según Köppen, se clasifica como *Aw*, cálido-húmedo, con temperaturas media de 18°C en el mes más frío con lluvias en verano (abril-junio). En julio y agosto las temperaturas oscilan entre 26 y 28°C. La precipitación media anual oscila entre 1100 y 1500 mm, las mayores lluvias se registran durante mayo-octubre, y oscilan entre 1800 y 2700mm. La mínima precipitación ocurre entre noviembre y abril, y llega aproximadamente a valores de 600 a 1000 mm. Los ciclones alcanzan velocidades de hasta 180 km por hora durante los meses de mayo-octubre y son los fenómenos meteorológicos responsables de las precipitaciones inusuales a la Península de Yucatán (INEGI, 2016).

La Laguna Manatí fue declarada como área natural protegida (ANP), en el año 1999. En las últimas décadas la función de las ANPs, ha cambiado de ser simplemente medio para asegurar la riqueza biológica a una fuente de desarrollo sustentable de las comunidades humanas, que habitan alrededor de ellas (Orozco-Jiménez *et al.*, 2015). Las zonas declaradas como áreas naturales protegidas representan una herramienta de la política ambiental y constituida por una riqueza biológica de gran valor (DOF, 1999; Caso *et al.*, 2004). Las áreas naturales protegidas almacenan grandes cantidades de dióxido de carbono (CO₂), incrementa la resiliencia y reduce la vulnerabilidad de las comunidades que enfrentan el cambio climático (Campbell *et al.*, 2007). La Laguna Manatí (Figura 1) es una zona sujeta a conservación ecológica, tiene un área de

202.99 hectáreas, y se ubica a los 21°10'53" de latitud norte y 86°48'46" de longitud oeste, en la porción noreste de la ciudad de Cancún, en el noreste del estado de Quintana Roo. El polígono se encuentra entre la colonia Donceles 28, colonia Vicente Lombardo Toledano, Corales y Puerto Juárez.

El tipo de suelo que prevalece en el área de la Laguna Manatí es el tipo Solonchak, negro parduzco, no son aptos para realizar construcciones masivas, debido a que su escasa o nula consolidación, que lo hace susceptible de deslizamiento o hundimientos (SEDATU, 2013). La vegetación dominante en el entorno de Laguna Manatí está constituida por comunidades de gramínoideas y manglares (*Conocarpus erectus*, *Laguncularia racemosa*, *Rhizophora mangle*, *Avicennia germinans*). En menor proporción hay selva baja, matorral costero y vegetación de dunas costeras. La fauna acuática incluye aves migratorias y nativas (*Tigrisoma mexicanum*, *Aramus guarauna*, *Butoriles virenses*, *Aldea alba*), así como la presencia de dos especies de cocodrilo (*Crocodylus moreletti* y *Crocodylus acutus*) (SEDATU, 2013).

2.2 Colecta de Muestras de agua

Se establecieron cuatro zonas para la toma de muestras de agua, sedimento y zooplancton (rotíferos, copépodos, cladóceros y ostrácodos). Estas zonas de muestreo se seleccionaron cumpliendo con los requisitos de relevancia ecológica, accesibilidad, y facilidad de reconocer en el área de estudio. Las zonas son nombradas: 1) Canal de drenaje (ubicado en el sur de la Laguna Manatí), que recibe directamente las aguas pluviales y descargas domésticas ilegales de la zona urbana; 2) la zona este de la Laguna Manatí, destacada como región con alta frecuencia de pescadores; 3) zona oeste con depósitos de sedimentos; y 4) la zona norte, con influencia de basurero clandestino. Se realizó la colecta de las muestras de agua, sedimento y zooplancton en el mes de abril del 2021, un total de 12 muestras de agua y sedimento y 6 de zooplancton (Figura 1).

Ubicación de los sitios de muestreo en Laguna Manatí, Quintana Roo, México

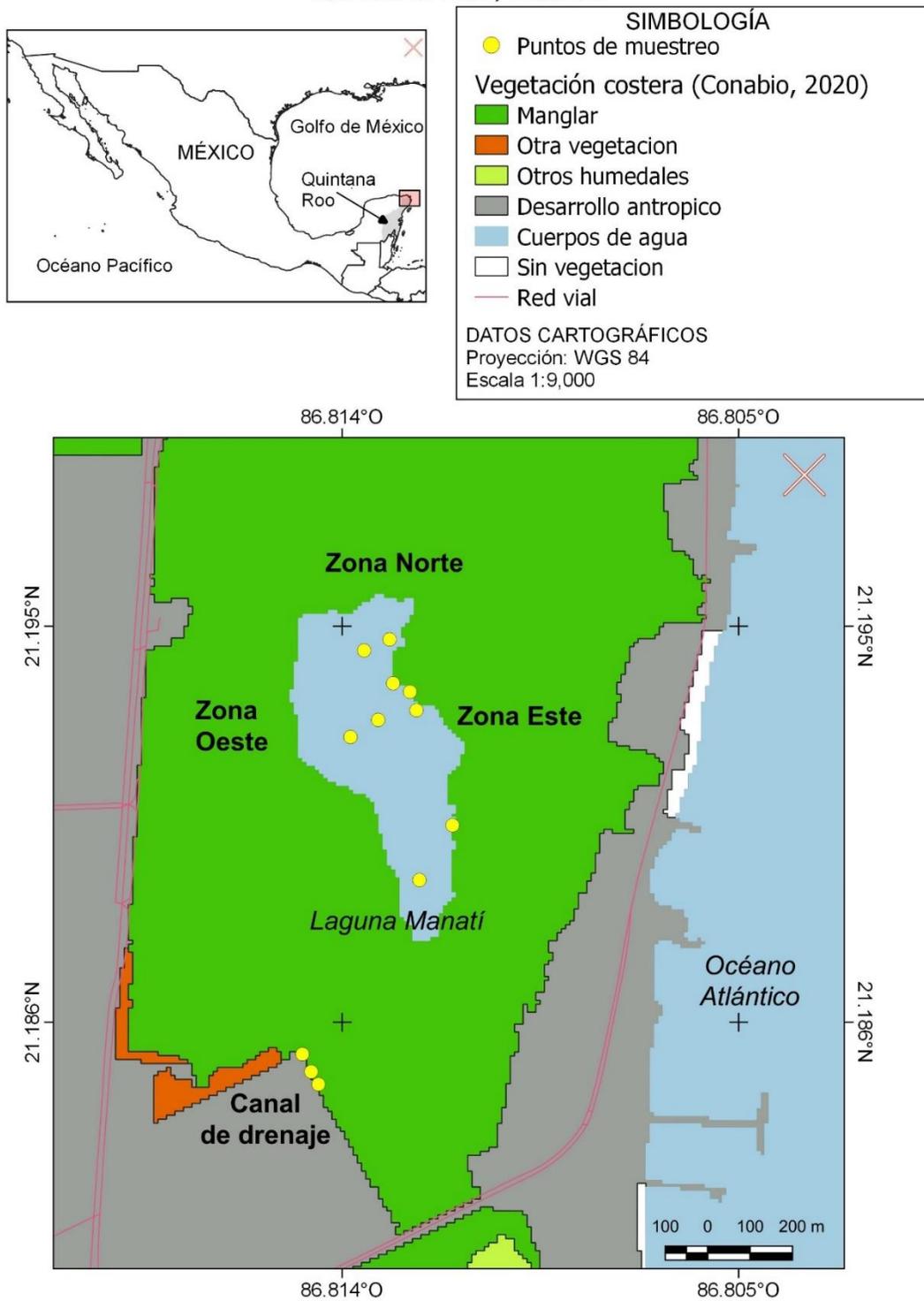


Figura 1. Mapa de área de estudio, Laguna Manatí, municipio de Benito Juárez, Quintana Roo.

Los parámetros fisicoquímicos temperatura ($^{\circ}\text{C}$), pH, potencial redox (mV), conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) y salinidad (g/L), se midieron *in situ* con la sonda paramétrica HANNA modelo HI98195 previamente calibrada. En cada sección en donde se seleccionaron los sitios, se marcaron con coordenadas geográficas con GPS Montana 680, para ubicar los puntos de muestreo.

La toma de muestra de agua se realizó en botellas limpias de un volumen de 1 litro (Figura 2), con previo baño ácido (HCl 10%) y después se enjuagaron con agua destillada para evitar que las muestras fueran contaminadas con residuos anteriores. Para la obtención de las muestras de agua, fueron colectadas utilizando una cubeta de 10 L, la cual se amarro a una cuerda, se enjuago con agua del sitio, y se lanzó a 3 m de distancia de la embarcación aproximadamente. Se filtró el agua con una malla para evitar la entrada de partículas de gran tamaño. Al llegar al laboratorio, las muestras se filtraron con filtros de membrana de nitrocelulosa ($0.45\ \mu\text{m}$) y después se acidificaron con ácido nítrico ultra puro (HNO_3), hasta obtener un pH de 2 y fueron almacenadas a una temperatura de $4\ ^{\circ}\text{C}$ hasta cuantificación de los metales. El análisis de la muestra de agua se realizó con un espectrómetro de plasma óptica de acoplamiento inductivo (ICP-OES) modelo optima 8000, Marca Perkin Elmer.



Figura 2. Colecta de agua en Laguna Manatí. Foto: Jorge Peniche Perez.

2.3 Colecta de sedimento.

Las muestras de sedimento se colectaron con una red “D” con apertura de luz de 0.25 mm en el fondo (Figura 3), se usó material plástico para cubrir la parte metálica de la red, para reducir la interferencia del instrumento con los elementos metálicos presentes en el sitio de muestreo. Después, se almacenaron las muestras en bolsas plásticas de cierre (Ziploc®) con una capacidad máxima de 500 g y se transportó etiquetado. En el laboratorio, las muestras fueron secadas en el horno de secado modelo DX-500, a una temperatura constante de 60 °C, por aproximadamente 36 horas. Después del proceso de secar las muestras, se utilizaron tamices plásticos con aperturas de malla $\leq 2\text{mm}$. Finalmente, se siguió el método de digestión ácida para las muestras de sedimentos (EPA 3051A).



Figura 3. Colecta de sedimento en la Laguna Manatí. Foto: Mónica Salas.

El método de digestión ácida para las muestras de sedimento EPA 3051A se realizó de la siguiente forma. Se pesaron 0.5 g del material fino de cada muestra (por duplicado) y se depositaron en los tubos de digestión. Se agregaron 10 mL de ácido nítrico ultrapuro (HNO_3) (1:1). La digestión ácida se completa en el microonda de marca MARS5 previamente programado con el método EPA 3015 (1200 W 60 %, 10 min rampa, 100°C, 10 min continuos a 170 °C). Después, las muestras se enfrían a temperatura ambiente en los tubos de digestión, se transfiere a matraces volumétricos de 50 mL y se aforaron con agua desionizada. Las muestras digeridas y aforadas se vaciaron en tubos cónicos de 50 mL, y se guardaron en el refrigerador a una temperatura entre 4-5° C hasta su análisis. Las muestras se analizan después con el espectrómetro de plasma óptica de acoplamiento inductivo (ICP-OES).

2.3.1 Determinación de pH, materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico en las muestras de sedimento

La determinación del pH en las muestras de sedimento se determinó con el método de agua 1:2, donde se tomaron 10.0 g de la muestra (por duplicado), previamente secado y tamizado, y se disolvió en 20 mL de agua desionizada, con el uso del agitador magnético. Después con el potenciómetro previamente calibrado se midió el pH en las muestras de sedimento.

La determinación del contenido (porcentaje) de carbón orgánico (*C orgánico*) y la materia orgánica en sedimento se realizó con el método Walkley-Black (1947, modificado por Global Soil Laboratory Network-GLOSOLAN, 2019) con 1.0 g de sedimento de cada muestra. El análisis se realizó por duplicado, el porcentaje de materia orgánica es el producto del % de carbón calculado por el factor experimental de la materia orgánica. El carbono orgánico se estima con la siguiente fórmula

$$\% \text{Carbono orgánico} = \frac{(V_{g,\text{blanco}} - V_{g,\text{muestra}}) \times MFe^{2+} \times 12 \times 100}{\text{Peso de la muestra} \times 4000} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde

$V_{g,\text{blanco}}$: Volumen gastado en el blanco

$V_{g,\text{muestra}}$: Volumen gastado en la valoración

Peso de la muestra: 1.0 gramos de la muestra seco y tamizado

El porcentaje de materia orgánica se estima con la siguiente fórmula

$$\% \text{Materia Orgánica} = \frac{\% C \text{ total} \times 1.72}{0.58} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Para la determinación de la capacidad de intercambio catiónico (CIC), se siguió el método de acetato de amonio 1N pH 7 (Atuesta- Rengifo, 2015). Se utilizaron 5.0 g de sedimento de cada muestra (por duplicado), y posteriormente se agregó 25.0 ml de acetato de amonio ($\text{CH}_3\text{COONH}_4$) 1N a pH= 7.0, para indicar la capacidad de las muestras de sedimento para retener cationes (elementos positivamente cargados). Los cationes están retenidos por partículas de arcilla y humus cargadas negativamente llamadas coloides.

La fórmula para determinar la CIC es:

$$CIC (meq/100g) = \frac{(V_{g,NaOH} - V_{g,blanco NaOH}) \times 100}{Peso\ de\ la\ muestra} \quad (\text{Ecuación 5})$$

donde el peso de la muestra de suelo fue 5.0 g, $V_{g,NaOH}$ es el volumen de NaOH gastado en el filtrado de la muestra y $V_{g, blanco NaOH}$ es el volumen de NaOH en filtrado del blanco.

2.4 Colecta de zooplancton.

Un total de seis muestras de zooplancton, tres en el canal de drenaje, y una muestra en zona este, zona oeste y zona norte de la Laguna Manatí. La colecta de zooplancton se realizó utilizando una cubeta de 10 L, la cual se amarró a una cuerda, se enjuagó la cubeta con agua del sitio, y se lanzó a 3 m de distancia de la embarcación. En seguida se arrastró aproximadamente a velocidad de 1 m s^{-1} . Una vez terminado el recorrido, se sacó la cubeta y por medio de una red de zooplancton tipo Wisconsin de $54\ \mu\text{m}$ de apertura de malla se filtraron aproximadamente 100 L (Figura 4). Al final del filtrado, se separó la botella de la red y se obtuvieron muestra concentradas mL de zooplancton a 250 por sitio en botellas previamente etiquetada, se taparon, y guardaron a temperatura ambiente. En laboratorio, se procesaron las muestras concentrando la muestra de 250 mL a 10 mL usando la misma red de $54\ \mu\text{m}$ de apertura. Se observaron las muestras en microscopio estereoscópico para aislar e identificar las especies de rotíferos, cladóceros, copépodos y ostrácodos encontradas utilizando claves dicotómicas (Koste, 1978; Elías Gutiérrez, *et al.*, 2008), al final las muestras fueron preservadas con formol al 5%.



Figura 4. Colecta de zooplancton con red de Wisconsin de $54\ \mu\text{m}$ en la Laguna Manatí. Foto: Jorge Peniche Perez.

2.4.1 Determinación de riqueza y abundancia de especies.

La riqueza de especies es el número de especies diferentes encontradas en una comunidad particular. La abundancia es la representación relativa o número de individuos encontrada en la muestra (Rodríguez, 2001). La determinación de riqueza y abundancia de especies es según la metodología de Gómez-Márquez *et al.*, (2013), de las muestras preservadas con formol al 5%. Se contaron los grupos y especies de cada muestra en 1 mL utilizando el microscopio invertido (Figura 5), tratando de cuantificar cada microorganismo en las muestras concentradas de 10 mL, y a su vez se separaron por especies y sitios manteniéndose a temperatura ambiente. La ecuación para determinar la abundancia es:

$$\frac{\text{No de organismos}}{L} = \frac{(C) (V_1)}{(V_2) (V_3)} \quad (\text{Ecuación 6})$$

Dónde C es el número de organismos cuantificados, V_1 es el volumen que se concentró, V_2 es el volumen contado y V_3 es el volumen de la muestra (Hanim- Ismael y Azrin- Zaidin, 2015).

La riqueza se determinó con el índice de Margalef:

$$D_{Mg} = \frac{(S-1)}{\ln(N)} \quad (\text{Ecuación 7})$$

Dónde D_{Mg} es el índice de Margalef (Mora-Donjuán *et al.*, 2017), S es el número de especies presentes, ln es el logaritmo natural y N es el número total de individuos.



Figura 5. Determinación de riqueza y abundancia. Foto: Dino Demidof.

2.4.2 Cuantificación de metales en biota acuática.

Las muestras de zooplancton se separaron por especie y sitios. Después de aislar e identificar los organismos, fueron almacenados por especies en micro-tubos “Eppendorf” de 1.5 mL con 0.5 mL de ácido nítrico ultrapuro (HNO_3) y 0.5 mL de agua destilada. Los micro-tubos se calentaron en termoblock a temperatura de 100.0 a 100.2°C durante dos horas (Figura 6), posterior a lo cual se observaron en el microscopio para asegurar que no hubiera partículas sin digerir. Las muestras digeridas se aforaron a un volumen final de 10 mL con agua desionizada, (Modificado de Alvarado-Flores, *et al.*, 2012). La cuantificación de metales se realizó con un espectrómetro de plasma de acoplamiento inductivo (ICP-OES) modelo optima 8000, Marca Perkin Elmer.



Figura 6. Los micro tubos de “Eppendorf” con los organismos se calienta en un baño ácido a temperatura de 100.0-100.2°C. Foto: Dino Demidof.

2.5 Análisis de los datos

Una vez obtenidas las concentraciones de metales en las muestras de agua, sedimento y zooplancton, realizamos un análisis estadístico descriptivo para las muestras con resultados cuantificables (por arriba del límite de detección). Para conocer las diferencias significativas entre los sitios se realizó comparaciones de medias en STATISTICA, con un nivel de confianza de 95%. También se utilizó programa STATISTICA (Versión 14.0.0.15 © 1984-2020 TIBCO Software Inc. TIBCO Data Science Workbench) para realizar los gráficos. Además, con el JMP Statistical Software hicimos un análisis estadístico bivariado para mostrar con una línea de ajuste el elemento potencialmente tóxico versus el elemento de referencia.

2.6 Obtención de los factores de bioacumulación.

Los factores de la bioacumulación en los tejidos se determinan con la siguiente fórmula (Walker *et al.*, 2012):

$$FBA = \frac{CB}{CWD} = \frac{\{k1+kD(\frac{CB}{CWD})\}}{k2+Ke+Km+Kg} \quad (\text{Ecuación 8})$$

Por lo cual, los factores de bioacumulación se obtendrán en los sitios donde se detecte el metal en las dos matrices, agua y biota.

2.7 Determinación del grado de la contaminación ambiental usando los factores de enriquecimiento (FE) y los índices de geoacumulación (I_{geo}).

La determinación del grado de contaminación en el sedimento de Laguna Manatí se basa en la determinación de los factores de enriquecimiento (FE, fuente de aportación de los metales analizados) y los índices de geoacumulación (I_{geo}).

El FE se calcula mediante la siguiente formula:

$$FE = (X/Y)_{muestra}/(X/Y)_{corteza} \quad (\text{Ecuación 9})$$

que refiere a una relación entre la concentración del metal potencialmente enriquecido (X) con respecto a un elemento de referencia (Y) encontrado en la muestra, y al promedio presente en la corteza terrestre. $FE < 2$ sugiere enriquecimiento mínimo, $2 \leq FE \leq 5$ enriquecimiento moderado, $5 \leq FE \leq 20$ enriquecimiento significativo, $20 \leq FE \leq 40$ es un enriquecimiento muy alto y $FE > 40$ es enriquecimiento extremadamente alto.

El I_{geo} se calcula mediante la siguiente formula:

$$I_{geo} = \log_2 C_n / 1.5 B_n \quad (\text{Ecuación 10})$$

donde C_n es la concentración del metal examinado, y B_n es la concentración geoquímica del metal encontrado en la corteza terrestre. La escala de evaluación es no contaminada ≤ 0 , no contaminado a moderado ($0 \leq I_{geo} \leq 1$), moderado ($1 \leq I_{geo} \leq 2$), moderado a fuerte ($2 \leq I_{geo} \leq 3$), fuerte ($3 \leq I_{geo} \leq 4$), fuerte a extremadamente fuerte ($4 \leq I_{geo} \leq 5$) y extremadamente ($I_{geo} \geq 5$). Los valores que se han tomado como concentraciones basales para los elementos encontrados en nuestras muestras son las concentraciones teóricas de rocas sedimentarias de tipo

carbonatados por Turekian y Wedepohl (1961). En la Tabla 2, se muestra las concentraciones basales para cada uno de los metales analizados en las muestras de la Laguna Manatí.

Tabla 2. Concentraciones basales para sedimentos adoptados para la Laguna Manatí

Elemento	Concentración teórica basal (mg kg⁻¹)
Al	4200
Ba	10.0
B	20.0
Co	0.1
Cr	11.0
Cu	4.0
Fe	3800
Mn	1100
Ni	20.0
Pb	9.0
Zn	20.0

El modelo conceptual de la Figura 7 representa una guía básica para la determinación del grado de contaminación ambiental en Laguna Manatí por la presencia de metales. La cuantificación de los metales pesados en agua y sedimento son la base para *a)* identificar si hay presencia de metales, *b)* si las concentraciones rebasan los límites máximos permitidos por la normatividad y *c)* para estimar el grado de contaminación ambiental. La cuantificación de metales en zooplancton se realizará para calcular los factores de bioacumulación y evidenciar si existe biomagnificación. Al final, el análisis de la contaminación ambiental es la integración y la decisión final con base en la evidencia y los datos generados. La información del diagrama de flujo es explicada en los siguientes pasos:

1. Cuantificación de la concentración de metales pesados en agua, sedimento y biota acuática.
2. Determinación de los factores de enriquecimiento y los índices de geoacumulación en sedimento, y valoración de medidas toxicas como CL₅₀, NOEC, LOEC y CE₅₀.
3. Consultar la base de datos (medidas de toxicidad) de la Unidad de Ciencias del Agua del laboratorio de ecotoxicología y base de datos de la Agencia de Protección Ambiental de EUA, y artículos científicos en la literatura.
4. Cálculos de valores PNEC (CL₅₀/ 1000).
5. Si excede los valores de las concentraciones de los metales pesados las referencias de SQuiRTs (Buchman, 2008), para la obtención del grado de la contaminación ambiental.

6. Determinación de las implicaciones ecológicas y sobre la salud del medio biofísico. Toma de decisión; con base en la información del medio biofísico.

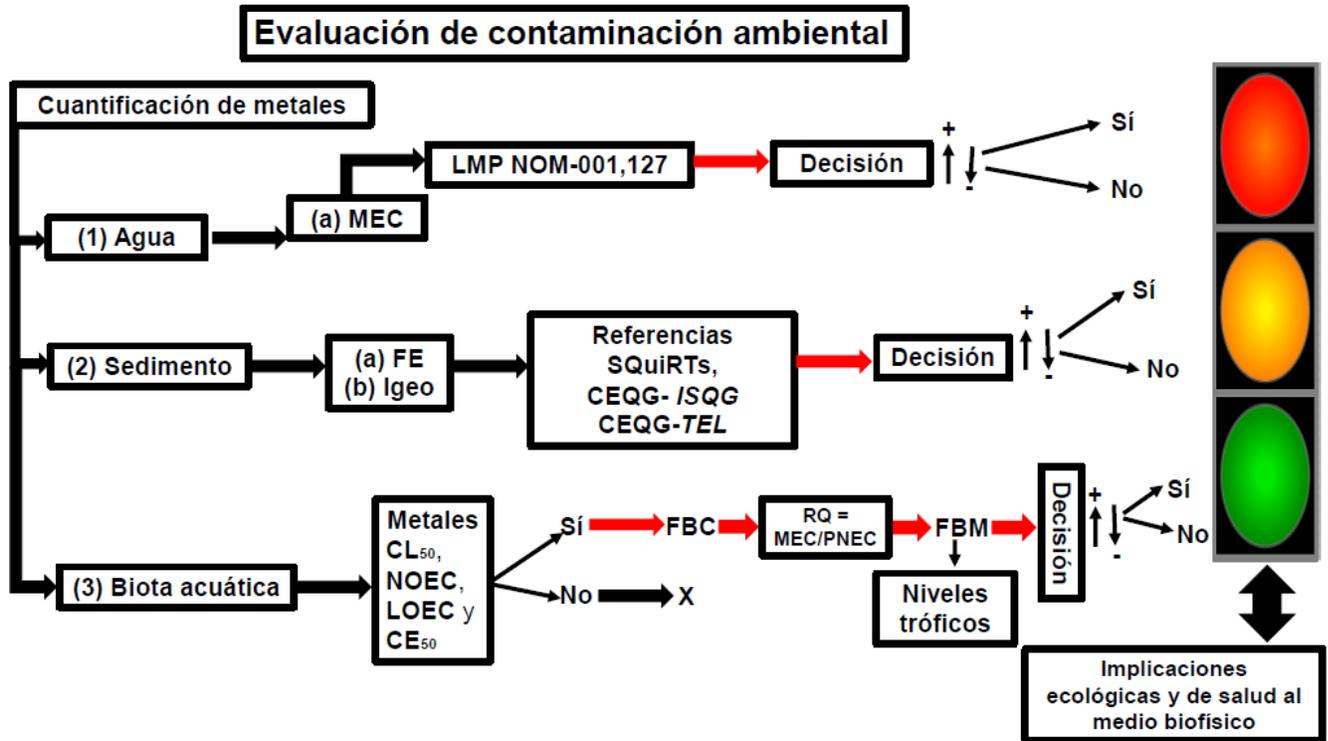


Figura 7. Diagrama de flujo para determinar la contaminación ambiental del área de estudio laguna Manatí, situada en la zona urbana de Cancún, noreste del estado Quintana Roo.

2.8 El índice de riesgo ecológico potencial en sedimento (RI)

El índice de riesgo ecológico potencial fue introducido para evaluar la contaminación por metales pesados en sedimentos conforme la toxicidad de los metales pesados, y la implicación que provoca sobre el medio ambiente (Wu *et al.*, 2013; Xiao *et al.*, 2015).

La siguiente formula se utiliza para evaluar potencial de riesgo (Hakanson, 1980);

$$C_f^i = C_k^i / C_n^i \quad (\text{Ecuación 11})$$

donde C_f^i es el índice potencial de riesgo ecológico, C_k^i es la concentración del metal medida y C_n^i es la concentración basal del metal.

$$E_r^i = T_r^i / C_f^i \quad (\text{Ecuación 12})$$

donde E_r^i es el factor de riesgo potencial y T_r^i es el coeficiente de toxicidad del metal

Finalmente, el índice de riesgo ecológico potencial (RI) por contaminación total por metales se estima mediante la ecuación 12

$$RI = \sum T_r^i \times C_f^i \quad (\text{Ecuación 13})$$

con los coeficientes de toxicidad T_r^i de los metales Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb y Zn son 5,10, 5,1, 1, 5 y 5 respectivamente, (Wang *et al.*, 2020).

Tabla 3. Clasificación de riesgo ecológico (E_r^i) por cada metal según Hakanson (1980).

Clasificación (E_r^i)	Intervalo
Riesgo ecológico bajo	$E_r^i \leq 40$
Riesgo ecológico moderado	$40 \leq E_r^i \leq 80$
Riesgo ecológico relativamente alto	$80 \leq E_r^i \leq 160$
Riesgo ecológico alto	$160 \leq E_r^i \leq 320$
Riesgo ecológico extremadamente alto	$E_r^i > 320$

Tabla 4. Clasificación del potencial de riesgo (RI); contaminación total de metales pesados.

Clasificación (RI)	Intervalo
Riesgo potencial bajo	$RI \leq 150$
Riesgo potencial moderado	$150 \leq RI \leq 300$
Riesgo potencial relativamente alto	$300 \leq RI \leq 600$
Riesgo potencial extremadamente alto	$RI > 600$

2.9 El factor de evaluación del riesgo y umbral de riesgo ambiental

Según Karlsson (2008), el factor de evaluación de riesgo se determina analizando tres niveles tróficos de los organismos o biota acuática encontrada en el área de estudio con concentraciones de metales de pesados cuantificadas dentro del individuo. En nuestro caso cuantificamos las concentraciones de metales pesados en zooplancton (rotíferos, copépodos,

cladóceros y ostrácodos), organismos heterótrofos, que por sus patrones de alimentación es justificado realizar el factor de evaluación de riesgo, debido al hecho que aprovechan de otros micro-organismos (algas unicelulares, bacterias, rotíferas, crustáceos, y en algunos casos en larvas de pez), que potencialmente son contaminados con la presencia de concentraciones de metales pesados de interés.

La evaluación del umbral de riesgo ambiental se determina por la división de la concentración efectiva en el medio (MEC) entre la concentración predictiva sin efecto (PNEC). Las siguientes tablas (Tabla 5 y 6) representan el intervalo del factor de evaluación de riesgo y la evaluación del umbral del riesgo ambiental acorde a Karlsson, respectivamente;

$$RQ = \frac{MEC}{PNEC} \quad (\text{Ecuación 14})$$

Tabla 5. Factor de evaluación de riesgo acorde a Karlsson (2008) con grupo de base.

Grupo base	Factor de riesgo
Grupo base + un NOEC agudo de un organismo zoo planctónico	1000
Grupo base + dos NOEC agudo de un organismo zoo planctónico	100
Grupo base + tres NOEC agudo de un organismo zoo planctónico	10

Tabla 6. Evaluación del umbral de riesgo ambiental acorde a Karlsson (2008).

RQ	INTERPRETACIÓN
< 0.1	Riesgo ambiental insignificante
0.1-1	Riesgo ambiental bajo
1-10	Riesgo ambiental moderado
>10	Riesgo ambiental alto

CAPITULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados de parámetros fisicoquímicos en agua y sedimento.

En la tabla 7 se representan los valores promedio de los parámetros fisicoquímicos de las cuatro secciones en Laguna Manatí en agua. La Tabla 8 muestra los valores de pH, materia orgánica y capacidad de intercambio catiónico en las muestras de sedimento.

Tabla 7. Parámetros fisicoquímicos del agua en cuatro secciones de Laguna Manatí. Valores Promedio \pm d.e.

Parámetro	Sección 1 Canal de Drenaje	Sección 2 Este	Sección 3 Oeste	Sección 4 Norte
pH	7.20 \pm 0.12	8.37 \pm 0.44	8.66 \pm 0.12	8.24 \pm 0.15
Temperatura (°C)	27.28 \pm 0.41	29.79 \pm 0.33	29.92 \pm 0.51	28.91 \pm 0.10
Potencial redox (mV)	-0.7 \pm 81.82	77.9 \pm 33.13	60.6 \pm 28.02	21.2 \pm 68.51
Salinidad (mg/L)	1.8 \pm 0.001	3.43 \pm 0.1	3.49 \pm 0.02	3.44 \pm 0.07

Tabla 8. Resultados del sedimento analizados en el laboratorio.

	pH	Materia orgánica (%)	CIC (meq/100g)
Canal de Drenaje			
P1	7.3 \pm 0.014	0.5 \pm 0.13	111 \pm 1.41
P2	7.1 \pm 0.014	0.5 \pm 0.09	108 \pm 2.83
P3	7.4 \pm 0.021	0.5 \pm 0.00	112 \pm 8.49
Este			
P4	7.5 \pm 0.099	0.6 \pm 0.03	67 \pm 1.41
P5	7.6 \pm 0.078	0.1 \pm 0.03	115 \pm 9.90
P6	7.6 \pm 0.042	0.2 \pm 0.03	115 \pm 1.41
Oeste			
P7	7.6 \pm 0.028	0.8 \pm 0.03	138 \pm 39.60
P8	7.7 \pm 0.078	0.8 \pm 0.03	158 \pm 8.49
P9	7.7 \pm 0.198	0.8 \pm 0.00	197 \pm 1.41
Norte			
P10	7.5 \pm 0.092	0.5 \pm 0.06	200 \pm 0.00
P11	7.4 \pm 0.148	0.6 \pm 0.03	139 \pm 4.24
P12	6.3 \pm 0.064	0.5 \pm 0.03	237 \pm 1.41

3.2 Resultados de la cuantificación de metales en agua y sedimento.

Se muestran los resultados del análisis de metales en agua y sedimento en la Tabla 9 y Tabla 10, respectivamente. En agua (Tabla 9), no se obtuvieron valores por arriba de los límites de detección de los metales analizados; no se puede concluir que no estén presentes, pero no se pudieron cuantificar.

Tabla 9. Metales pesados en las muestras de agua.

	Metales en agua (µg/L)										
	Al	Ba	B	Co	Cu	Cr	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
	<i>Canal de drenaje</i>										
P1	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM
P2	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM
P3	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM
	<i>Este</i>										
P4	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM
P5	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM
P6	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM
	<i>Oeste</i>										
P7	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM
P8	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM
P9	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM
	<i>Norte</i>										
P10	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM
P11	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM
P12	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM
<i>NOM-001</i>	0.05	0.01	-	*	-	1.0	1.0	-	1.0	0.2	-

<LDM = inferior al límite de detección del método.

Las muestras de sedimento del canal de drenaje tienen concentraciones mayores en algunos metales en comparación con el resto de las zonas de la Laguna Manatí. Las diferencias se encontraron en los metales Al (F=62.48 p= 0.00001), Ba (F=10.49 p= 0.0038), Co (F=3.13 p=0.0087), Cu (F=5.24 p=0.027), Fe (F=29.72 p=0.0001) y Mn (F= 2331.94 p< 0.001). El elemento B solo se cuantificó en la zona este (zona de pescadores y recreación). En las cuatro zonas del área de estudio, los metales Ni y Zn, son diferentes estadísticamente significativas en cada zona de estudio de la Laguna Manatí (F=3.00 p=0.09 y F=2.89 p=0.10). Por lo tanto, se acepta la hipótesis planteada que ciertos elementos se cuantificaron en mayor concentración en el canal de drenaje. En la Tabla 10., se presenta los promedios de los valores de cuantificación de los metales en las muestras de sedimento, las referencias de SQuiRTs según Buchman (2008), y también las referencias internacionales de Canada y Estados Unidos, con el objetivo de realizar la comparación de los valores obtenidos y los límites máximos permisibles.

Tabla 10. Cuantificación promedio de metales pesados en las muestras de sedimento.

		Metales en sedimento (mg/Kg)										
		Al	Ba	B	Co	Cu	Cr	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
<i>Canal de drenaje Sur</i>												
P1		6647.00 ± 32.32	8.23 ± 0.05	<LDM	<LDM	11.93 ± 0.03	3.34 ± 0.03	729.0 ± 4.86	12.17 ± 0.30	0.61 ± 0.03	<LDM	327 ± 0.61
P2		6687.50 ± 19.29	9.89 ± 0.05	<LDM	0.15 ± 0.02	50 ± 0.40	5.78 ± 0.03	1386.5 ± 7.62	13.07 ± 0.26	5.54 ± 0.03	1.15 ± 0.14	2661.5 ± 5.22
P3		9426.00 ± 21.07	9.37 ± 0.08	<LDM	0.08 ± 0.05	25.2 ± 0.06	7.39 ± 0.01	1143.3 ± 11.50	12.55 ± 0.35	2.94 ± 0.02	<LDM	1010 ± 2.68
<i>Este</i>												
P4		253.70 ± 0.68	5.14 ± 0.02	37.5 ± 0.53	<LDM	4.48 ± 0.02	7.20 ± 0.01	54.35 ± 0.24	<LDM	1.63 ± 0.02	<LDM	409.5 ± 3.56
P5		156.20 ± 1.27	6.10 ± 0.02	2.15 ± 0.03	<LDM	3.0 ± 0.02	<LDM	33.05 ± 0.20	<LDM	0.23 ± 0.02	<LDM	209 ± 2.20
P6		112.85 ± 0.41	5.57 ± 0.02	<LDM	<LDM	2.56 ± 0.02	<LDM	27.95 ± 0.06	<LDM	0.15 ± 0.03	<LDM	88.91 ± 0.40
<i>Oeste</i>												
P7		91.45 ± 0.48	5.61 ± 0.01	<LDM	<LDM	2.93 ± 0.03	<LDM	12.2 ± 0.16	<LDM	<LDM	<LDM	85.08 ± 2.55
P8		138.45 ± 0.22	5.47 ± 0.02	<LDM	<LDM	2.74 ± 0.02	<LDM	21.75 ± 0.30	<LDM	<LDM	<LDM	59.05 ± 0.79
P9		136.00 ± 1.32	5.77 ± 0.01	<LDM	<LDM	4.94 ± 0.02	<LDM	18.45 ± 0.20	<LDM	0.22 ± 0.02	<LDM	55.21 ± 1.24
<i>Norte</i>												
P10		224.35 ± 0.61	5.20 ± 0.02	<LDM	<LDM	4.12 ± 0.01	<LDM	48.55 ± 0.51	<LDM	0.21 ± 0.02	<LDM	69.84 ± 2.28
P11		166.62 ± 0.40	4.87 ± 0.01	<LDM	<LDM	2.59 ± 0.01	<LDM	25.80 ± 0.08	<LDM	0.13 ± 0.01	<LDM	41.57 ± 2.62
P12		181.80 ± 1.25	1.23 ± 0.01	<LDM	<LDM	3.16 ± 0.03	<LDM	79.35 ± 0.38	<LDM	1.13 ± 0.04	<LDM	278.5 ± 3.83
<i>MEDIA</i>	<i>± D.E.</i>	2003.68 ± 3419.31	6.04 ± 2.29	3.30 ± 10.79	0.019 ± 0.05	1.98 ± 3.08	9.80 ± 14.25	298.35 ± 496.16	3.15 ± 5.70	1.07 ± 1.66	0.10 ± 0.33	441.26 ± 750.23
SQuiRTs		-	0.7	-	10.0	10.0- 25.0	7.0-13.0	-	400.0	9.9	4.0-17.0	7.0-38.0
ISQG		-	-	-	-	35.7	37.3	-	-	-	35	123
LEL		2.55	-	-	-	-	36	-	630	16	31	120
CP (Media/LEL)		785.76	-	-	-	-	0.27	-	0.005	0.07	0.003	3.68

(<LDM = inferior al límite de detección del método. SQiRTs (Screening Quick Reference Tables). Canada ISQG (Interim Sediment Quality Guideline), Lowest Effect Level- New Jersey Department of Environmental Protection (LEL- NJDEP), CP Cociente de Peligro.

3.3 Resultados de riqueza y abundancia de zooplancton.

En la tabla 11 se representa la lista de especies por zona de Laguna Manatí colectado en abril de 2021. La zona 1 canal de drenaje presenta la mayor cantidad de especies, y se puede destacar una alta riqueza y abundancia del género *Lecane*. En las tres otras zonas existe una baja riqueza y abundancia de los rotíferos, sin embargo, una alta presencia de cladóceros y copépodos.

Tabla 11. Especies encontradas en el periodo seco.

<i>Filo</i>	Clase	Orden	Especies	Zona 1 Canal de drenaje	Zona 2 Este	Zona 3 Oeste	Zona 4 Norte
	Eurotatoria	Ploima	<i>Lecane bulla</i>	X	X		X
	Eurotatoria	Ploima	<i>L. cornuta</i>	X			
	Eurotatoria	Ploima	<i>L. spinulifera</i>	X			
	Eurotatoria	Ploima	<i>L. ludwigii</i>	X			
	Eurotatoria	Ploima	<i>L. quadridentata</i>	X			
Rotífera	Monogononta	Ploima	<i>Brachionus ibericus</i>	X			
	Eurotatoria	Ploima	<i>B. falcatus</i>	X			
	Bdelloidea	Bdelloida	<i>Adineta vega</i>	X	X		
	Eurotatoria	Flosculariaceae	<i>Testudinella patina</i>	X	X		
Euglenozoa	Euglenoidea	Euglenales	<i>Euglena viridis</i>	X			
	Ostrácoda	Podocopida	<i>Cypridopsis vidua</i>	X	X	X	
Arthropoda	Branchiopoda	Cladóceras	<i>Ceriodaphnia cornuta</i>			X	X
	Maxillopoda	Cyclopoida	<i>Eucyclops serrulatus</i>	X	X	X	X

Se reporta la presencia de 13 especies, donde la mayor cantidad (9) corresponde al grupo de rotífera (69%), mientras que *Euglena viridis* presentan 7 %, y los grupos cladóceras, copépoda y ostrácoda representan el 8% de las especies. La abundancia de cada zona de Laguna Manatí se presenta en las tablas 12 a 15. La Tabla 16 muestra los valores de riqueza de acuerdo al índice de Margalef, que indica que la zona con mayor diversidad es el canal de drenaje, a pesar de ser la zona con mayor cantidad de metales detectados y en mayor concentración que el resto de la laguna Manatí.

Tabla 12. Abundancia de la Zona 1 (Canal de drenaje).

Zona	Grupo	Abundancia (n)	Abundancia relativa (%)	Organismos/ L
Zona 1 Canal de drenaje	Rotífera	912	48.48	40.00
	<i>Euglena viridis</i> .	822	43.70	36.00
	Ostrácoda	65	3.46	3.00
	Copépoda	82	4.36	4.00
	Total	1881	100	83.00

Tabla 13. Abundancia de la Zona 2 (este de Laguna Manatí).

Zona	Grupo	Abundancia (n)	Abundancia relativa (%)	Organismos/ L
Zona 2 Entrada a Laguna Manatí	Rotífera	44	66.67	56.00
	Copépoda	22	33.33	18.00
	Total	66	100	74.00

Tabla 14. Abundancia de la Zona 3 (oeste de Laguna Manatí).

Zona	Grupo	Abundancia	Abundancia relativa (%)	Organismos/ L
Zona 3 Depósitos de sedimentos	Ostrácoda	41	24.70	21.00
	Copépoda	83	50.00	42.00
	Cladóceras	42	25.30	21.00
	Total	166	100	84.00

Tabla 15. Abundancia de la Zona 4 (norte de Laguna Manatí).

Zona	Grupo	Abundancia	Abundancia relativa (%)	Organismos/ L
Zona 4 Norte de Laguna Manatí	Rotífera	12	17.39	14.00
	Cladóceras	25	36.23	30.00
	Copépoda	32	46.38	39.00
	Total	69	100	83.00

Tabla 16. Riqueza de especies de zooplancton (Margalef) en Laguna Manatí.

Zonas	Número de especies (S)	Número total de individuos (N)	Índice de Margalef	Clasificación
Canal de Drenaje	12	13	4.43	Alta
Zona Este	5	13	1.61	Baja
Zona Oeste	3	13	0.80	Baja
Zona Norte	2	13	0.40	Baja

La clasificación de riqueza según Margalef, $D_{Mg} \leq 2.0$ es baja, y $D_{Mg} \geq 4.0$ es alta.

3.4 Resultados de cuantificación de metales en zooplancton

Se analizaron el total de las muestras con organismos zooplanctónicos después de haber realizado la digestión acida. La cantidad de organismos empleados para el análisis fue el siguiente. En el Canal de Drenaje (P1, P2) 400 de rotíferos, 50 copépodos, 40 ostrácodos, 40 rotíferos del género *Testudinella* y 500 organismos del género *Euglena*. En la zona este 40 rotíferos y 20 copépodos (P4, P5, P6), en la zona oeste 40 de copépodos y 20 de cladóceros (P7, P8 y P9), y en la zona norte 20 cladóceros y 20 de copépodos (P10, P11 y P12). Las concentraciones de los metales en zooplancton se encontraron por debajo del límite máximo de detección de 20 µg / L (Tabla 17). Al no haber concentraciones cuantificables de metales en agua y zooplancton, no se obtiene evidencia de bioacumulación o biomagnificación en zooplancton y no se realizó ningún análisis posterior.

Tabla 17. Metales pesados en las muestras de biota acuática.

	Metales en biota acuática (µg/L)										
	Al	Ba	B	Co	Cu	Cr	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
<i>Canal de drenaje</i>											
P1	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM
P2	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM
P3	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM
<i>Este</i>											
P4	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM
P5	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM
P6	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM
<i>Oeste</i>											
P7	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM
P8	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM
P9	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM
<i>Norte</i>											
P10	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM
P11	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM
P12	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM

3.5 Determinación factores de enriquecimiento (FE) e índices geoacumulación (I_{geo})

En los siguientes gráficos se muestran los factores de enriquecimiento de los metales cuantificados en sedimento por cada zona de Laguna Manatí. En la figura 8 correspondiente a sedimentos en el canal de drenaje, se aprecia que los elementos Cr, Mn, Ni y Pb corresponden a enriquecimiento mínimo, y los elementos Al, Ba y Co presentan un enriquecimiento moderado, mientras el elemento Cu, muestra un enriquecimiento significativo hasta alto. En la figura 9 representa las muestras de la zona este de la Laguna Manatí, identificada como zona de frecuente pesca. Se muestra que Al y Ni presentan mínimo enriquecimiento. Los elementos B y Cr presentan moderado enriquecimiento en las muestras de sedimento, y Ba y Cu corresponden a un enriquecimiento de significativo hasta alto en esta zona de la laguna.

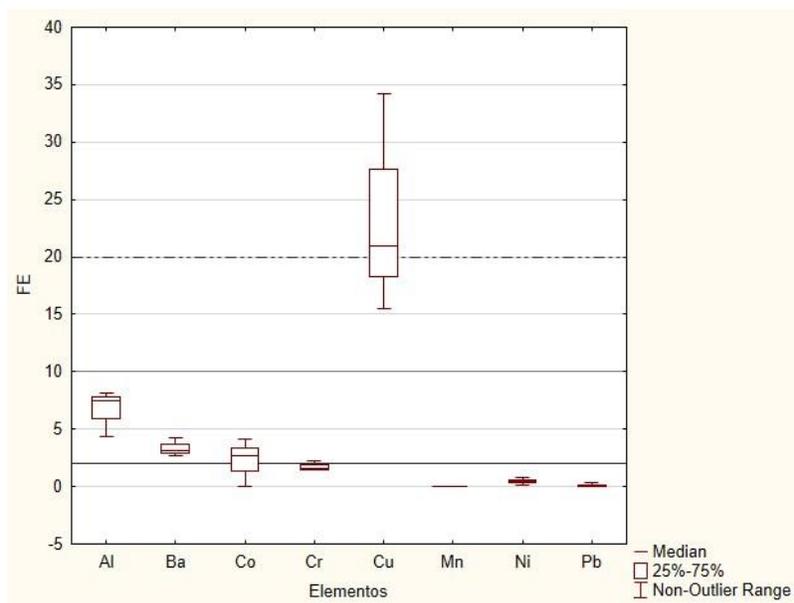


Figura 8. Factor de enriquecimiento aplicado a sedimento de Laguna Manatí (Canal de Drenaje). Enriquecimiento mínimo (≤ 2), Enriquecimiento moderado (≤ 10), Enriquecimiento significativo (≤ 20), y Enriquecimiento alto (≤ 40). Se marcan en las gráficas con líneas los valores de referencia.

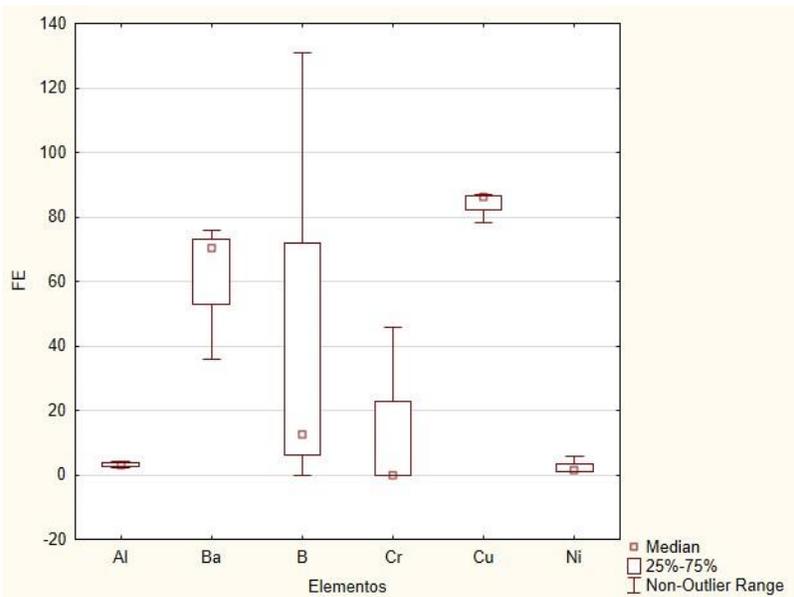


Figura 9. Factor de enriquecimiento aplicado a sedimento de Laguna Manatí (Zona Este). Enriquecimiento mínimo (≤ 2), Enriquecimiento moderado (≤ 10), Enriquecimiento significativo (≤ 20), y Enriquecimiento alto (≤ 40). Se marcan en las gráficas con líneas los valores de referencia.

En la figura 10, la zona oeste, que contiene los mayores depósitos de sedimento en la Laguna Manatí, los elementos Al y Ni presentan mínimo enriquecimiento. Los elementos Ba y Cu muestran enriquecimiento alto.

En la figura 11, los elementos Al y Ni corresponden a un enriquecimiento mínimo en las muestras de sedimentos analizadas en la zona norte de la Laguna Manatí. Esta zona es cercana al sitio del antiguo basurero electrodoméstico. Los elementos de Ba y Cu presentan enriquecimiento moderado- significativo hasta alto en esta sección estudiada de la Laguna Manatí.

Finalmente, debido a los altos valores del metal Zn, en la figura 12 se presenta éste metal en las cuatro zonas de la Laguna Manatí, con enriquecimiento significativo hasta muy alto, donde en el canal de drenaje los factores de enriquecimiento varían 85.23- 364.72, en la zona oeste y en norte de la Laguna Manatí los factores de enriquecimiento muestran valores similares que varían de 273.32 a 1325. 01. La zona este en la Laguna Manatí tiene una representación de factores de enriquecimiento muy alto con valores que varían de 604.40 hasta 1431.56.

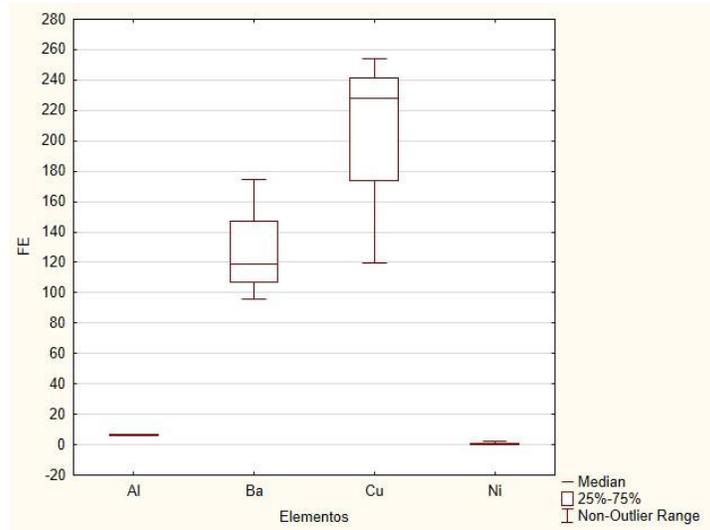


Figura 10. Factor de enriquecimiento aplicado a sedimento en la Laguna Manatí (Zona Oeste). Enriquecimiento mínimo (≤ 2), Enriquecimiento moderado (≤ 10), Enriquecimiento significativo (≤ 20), y Enriquecimiento alto (≤ 40). Se marcan en las gráficas con líneas los valores de referencia.

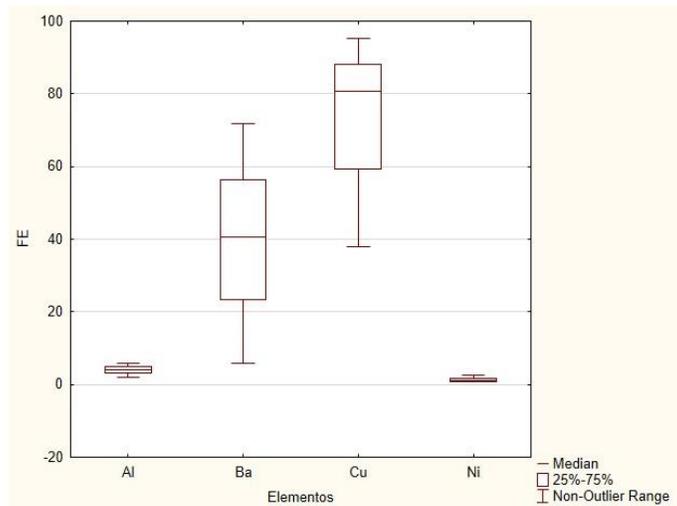


Figura 11. Factor de enriquecimiento aplicado en sedimento de Laguna Manatí (Zona Norte). Enriquecimiento mínimo (≤ 2), Enriquecimiento moderado (≤ 10), Enriquecimiento significativo (≤ 20), y Enriquecimiento alto (≤ 40). Se marcan en las gráficas con líneas los valores de referencia.

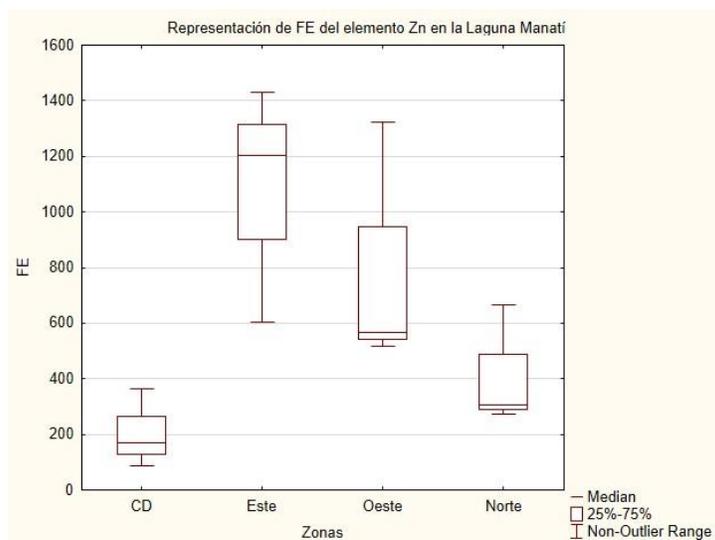


Figura 12. Factores de enriquecimiento del Zn en la Laguna Manatí. Enriquecimiento mínimo (≤ 2), Enriquecimiento moderado (≤ 10), Enriquecimiento significativo (≤ 20), y Enriquecimiento alto (≤ 40). Se marcan en las gráficas con líneas los valores de referencia.

Respecto a los índices de geoacumulación (I_{geo}), los sedimentos analizados del canal de drenaje sugieren que los elementos Ba, Co, Cr, Fe, Mn, Ni y Pb no representan contaminación, el Cu presenta contaminación moderada en la Laguna Manatí y podría presentar riesgos al medio ambiente.

En la figura 13, se observa que, en las muestras de sedimentos analizados en el este de Laguna Manatí, los elementos Ba, Cr, Cu, Fe y Ni no muestran contaminación. El elemento B, muestra una distribución amplia, no obstante, este elemento no se considera con potencial riesgo ambiental.

En la figura 14, se presenta que, en las muestras de sedimentos analizados en el oeste de Laguna Manatí, los elementos Ba, Cu, Fe y Ni no indican contaminación. Al contrario del FE , los elementos Ba y Cu muestran enriquecimientos significativos a altos, el I_{geo} demuestra que Ba y Cu podría representar riesgos ambientales menores para la Laguna Manatí.

En la figura 15, se observa que, en las muestras analizadas de sedimento del norte de la Laguna Manatí, los elementos Ba, Cu, Fe y Ni no muestran contaminación. Al contrario de Ba y Cu, su FE presenta enriquecimiento de moderado a significativo hasta alto, que significa que es

necesario monitorear la presencia de estos elementos, porque, en específico el Cu, puede representar riesgos ambientales para la Laguna Manatí.

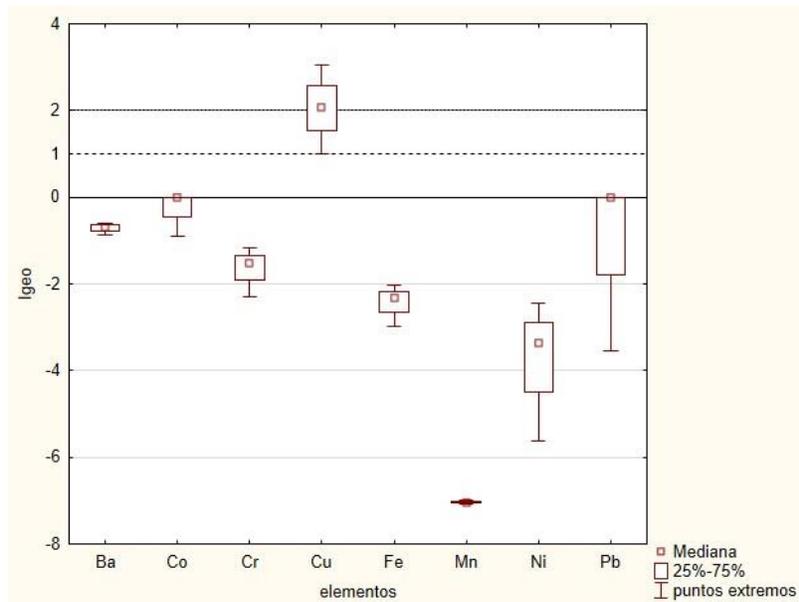


Figura 13. I_{geo} aplicada a sedimento de la Laguna Manatí (canal de drenaje). No contaminado (≤ 0), No contaminado a moderado (≤ 1), Contaminación moderada (≤ 2). Se marcan en las gráficas con líneas los valores de referencia.

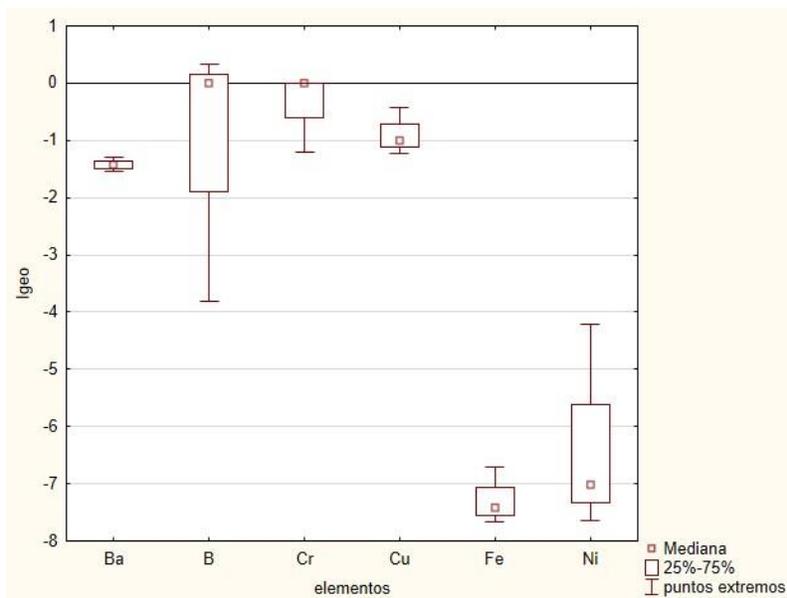


Figura 14. I_{geo} aplicada a sedimento de la Laguna Manatí (zona este). No contaminado (≤ 0). Se marcan en las gráficas con líneas los valores de referencia.

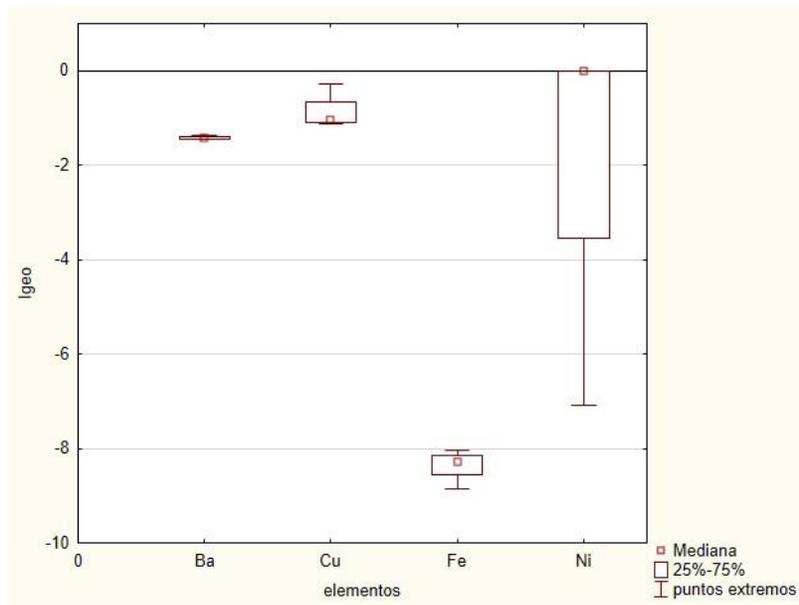


Figura 15. I_{geo} aplicada a sedimento de la Laguna Manatí (zona oeste). No contaminado (≤ 0). Se marcan en las gráficas con líneas los valores de referencia.

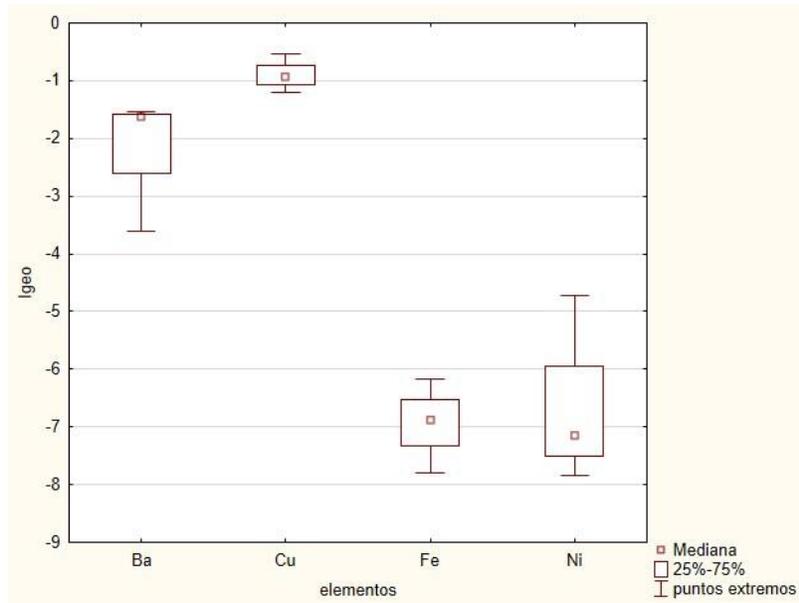


Figura 16. I_{geo} aplicada a sedimento en la Laguna Manatí (zona norte). No contaminado (≤ 0).

Es de especial atención el metal zinc (Zn). En las cuatro zonas de la Laguna Manatí, este elemento presenta un I_{geo} de no contaminado a moderado en las zonas este y norte de la Laguna Manatí, y en la zona oeste el I_{geo} es contaminación moderada, con contaminación alta en las zonas oeste y canal de drenaje (Figura 17). Similar a los factores de enriquecimiento en las zonas de Laguna Manatí, los enriquecimientos son de significativo a alto hasta muy alto, que significa que el elemento Zn podría causar riesgos ambientales graves para la Laguna Manatí.

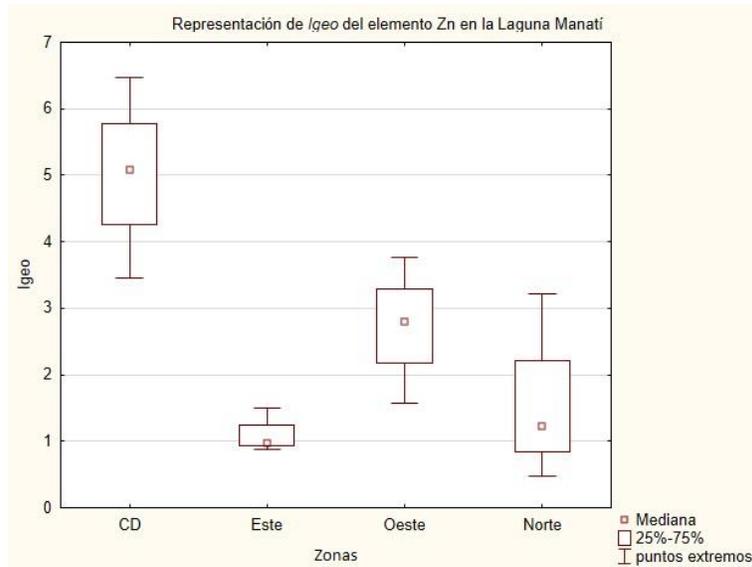


Figura 17. I_{geo} del elemento Zn en la Laguna Manatí. No contaminado (≤ 0), No contaminado a moderado (≤ 1), Contaminación moderada (≤ 2). Se marcan en las gráficas con líneas los valores de referencia.

3.6 Evaluación del riesgo ambiental

Con el índice de riesgo ecológico potencial (RI) hemos determinado el riesgo ecológico para los organismos bentónicos por la presencia de los metales en las cuatro zonas de la Laguna Manatí. En la tabla 18 se puede observar que el riesgo ecológico por cada metal (E^i_r). Para los metales Co, Cr, Cu, Mn, Ni y Pb es menor a 40, lo que significa riesgo ecológico bajo. El elemento Zn presenta riesgo ecológico moderado en la zona este de Laguna Manatí, simplemente por el cálculo teórico con la fórmula de factor de enriquecimiento. Sin embargo, los valores de concentraciones mayores se obtuvieron en la zona de canal de drenaje. Significa que, aunque el valor del riesgo ecológico fue mayor en una zona, debemos considerar también las concentraciones medidas de la zona en comparación con la zona con mayor concentración. En el canal de drenaje el riesgo ecológico se clasificó como extremadamente alto, que fue obtenida

por el cálculo teórico según las fórmulas de Hakanson (1980). Si observamos los valores de las concentraciones de los elementos potencialmente tóxicos, las concentraciones medidas fueron mayor en esta zona en comparación con las otras zonas. El riesgo ecológico potencial (RI), que representa el total de contaminación por los metales, reporta valores menores a 150 en la zona este, oeste y el norte de Laguna Manatí, que significa potencial riesgo ecológico por la presencia de estos metales es bajo. No obstante, el RI en el canal de drenaje es 378.72, un valor que corresponde a un intervalo de potencial de riesgo ecológico relativamente alto según la clasificación de Hakanson (1980), con la contribución mayor por el metal Zn (333.20).

Tabla 18. Evaluación de potencial de riesgo ecológico (RI) en Laguna Manatí.

Metales	Co	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn
<i>Canal de drenaje</i>							
C _f ¹	1.2	0.5	7.26	0.011	0.15	0.043	66.64
E _r ²	6	5	36.3	0.011	0.15	0.215	333.2
RI ³	378.72						
<i>Zona este de Laguna Manatí</i>							
C _f	-	0.22	0.84	-	0.034	-	11.79
E _r	-	2.2	4.2	-	0.034	-	58.95
RI	65.38						
<i>Zona oeste de Laguna Manatí</i>							
C _f	-	-	0.88	-	0.004	-	3.32
E _r	-	-	4.4	-	0.004	-	16.6
RI	21.004						
<i>Zona norte de Laguna Manatí</i>							
C _f	-	-	0.82	-	0.025	-	6.5
E _r	-	-	4.1	-	0.025	-	32.5
RI	36.63						

¹ índice potencial de riesgo ecológico ² factor de riesgo potencial ³ potencial de riesgo Ecológico

Las siguientes figuras (18 a 21) muestran el ajuste lineal de Fe con metales potencialmente contaminantes en la Laguna Manatí. Los datos por arriba de la línea de ajuste (95% I.C.) están enriquecidos, lo cual significa que tienen una fuente externa adicional al origen natural (representado por el Fe). Los valores por debajo de la línea están empobrecidos en ese elemento. Es importante destacar que el canal de drenaje tiene valores por arriba y por debajo del ajuste lineal, lo que significa que entrada de metales de fuentes externas (contaminación) pero también hay empobrecimiento; es decir, están retenidos en otro lugar, se han perdido o trasladado a otra matriz.

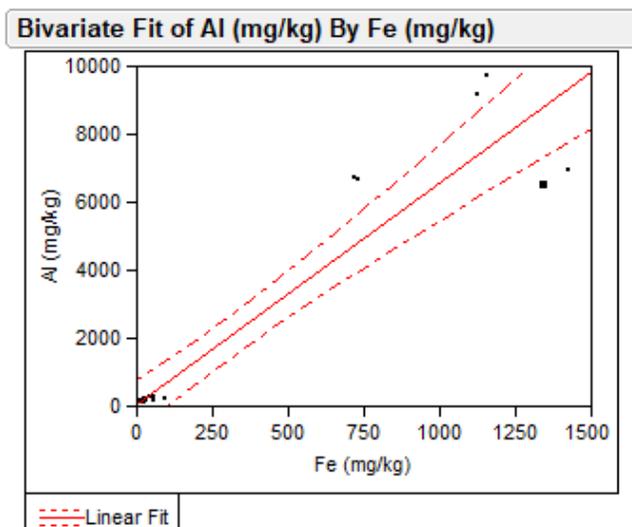


Figura 18. Ajuste lineal de metal potencialmente contaminante, Al vs Fe. Aluminio ($R^2=0.8985$, $RSME=1091.9$), valores superiores al ajuste 95% I.C.: P1 y P3 (Canal de Drenaje), valores inferiores al ajuste 95% I.C.: P2 (Canal de Drenaje).

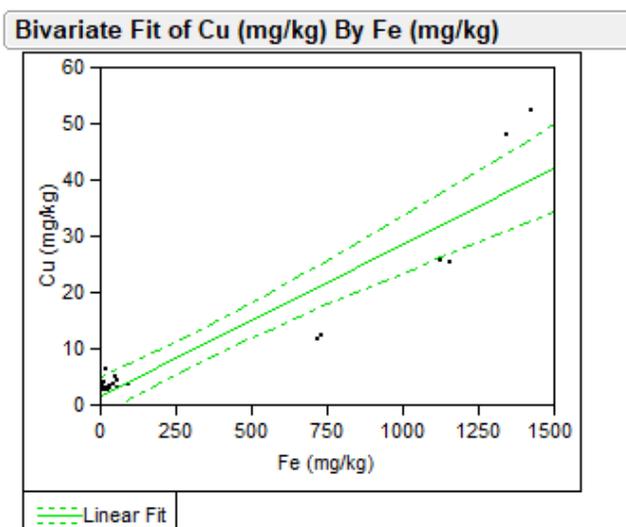


Figura 19. Ajuste lineal de metal potencialmente contaminante, Cu vs Fe. Cobre ($R^2=0.8778$, $RSME=4.9924$), valores superiores al ajuste 95% I.C.: P2 (Canal), P6 (Zona este), valores inferiores al ajuste 95% I.C.: P1, P3 (Canal de Drenaje).

Bivariate Fit of Ni (mg/kg) By Fe (mg/kg)

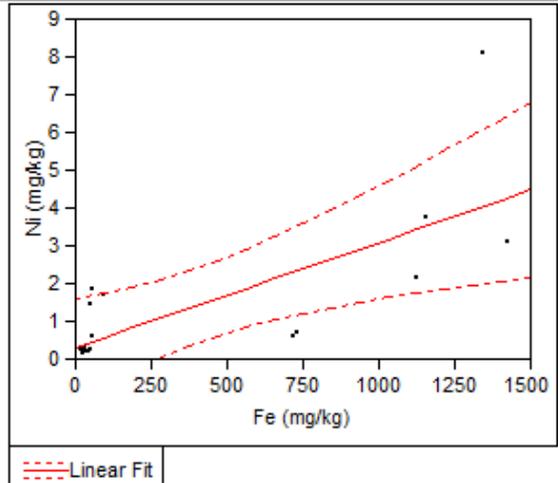


Figura 20. Ajuste lineal de metal potencialmente contaminante, Ni vs Fe. Níquel ($R^2= 0.5499$, $RSME=1.3987$), valores superiores al ajuste 95% I.C.: P4 (Zona este), P12 (Zona oeste), P2 (Canal de Drenaje), valores inferiores al ajuste 95% I.C.: P1 y P3 (Canal de Drenaje).

Bivariate Fit of Zn (mg/kg) By Fe (mg/kg)

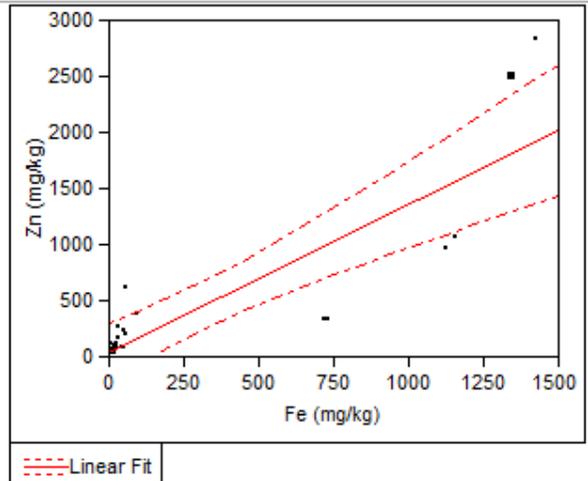


Figura 21. Ajuste lineal de metal potencialmente contaminante, Zn vs Fe. Zinc ($R^2=0.7519$, $RSME=376.0072$), valores superiores al ajuste 95% I.C.: P12 (Zona oeste), P4 (Zona este), P2 (Canal de Drenaje), valores inferiores al ajuste 95% I.C.: P1 y P3 (Canal de Drenaje).

3.7 DISCUSIÓN

3.7.1 Parámetros fisicoquímicos en agua y sedimento.

Los valores de pH en agua son considerados de ligeramente ácidos a ligeramente alcalinos y se encuentran dentro de los límites permitidos por la NOM-001-SEMARNAT-1996 (SEMARNAT, 1996^a) y la Guía Canadiense de la calidad de agua dulce. La temperatura del agua presentó valores dentro del límite permitidos por la normatividad mexicana (40 ° C), para la protección de la vida acuática (CCA-001/89). El potencial de óxido-reducción en las cuatro zonas varió de reductor (-0.7 mV) a moderadamente reductor (hasta 77.9 mV); mientras que los valores promedio de conductividad eléctrica (CE) indican que el canal tiene aportes de agua dulce, mientras que el resto de la laguna es ligeramente salobre.

Según Castro y Valdés (2012) las principales fuentes de la contaminación ambiental por metales pesados en los sistemas acuáticos son la basura de las viviendas, actividad agrícola y descargas industriales. En éste caso, la Laguna Manatí recibe desechos antropogénicos directa e indirectamente por el escurrimiento después de las aguas pluviales de la zona urbana, que por el canal de drenaje son transportados a la laguna. Esto se observa justo en la región del canal de drenaje, que, por su ubicación, adyacente a la colonia Vicente Lombardo Toledano, esta impactado por dicha escorrentía y que por diferencia en relieve, terminan principalmente en el canal de drenaje. La inexistencia de descargas de actividad industrial, la explotación de minerales en la cercanía de la laguna y/ o actividad de origen natural indica que las concentraciones de metales pesados en agua de la zona de estudio deben de originarse en la zona urbana (UNEP, 2013, Pirrone *et al.*, 2010, PNUMA, 2002).

El sedimento está ampliamente relacionado con los procesos geoquímicos y su composición nos permite comprender condiciones de gran importancia, como la concentración de contaminantes, y también las características de cada zona dentro de un estudio (Dassenakis *et al.*, 1997, Sadiq, 1992, Concalves *et al.*, 1990). En este estudio, hemos encontrado concentraciones de metales pesados en sedimento con importancia para el ambiente de la Laguna Manatí, que posiblemente han entrado al cuerpo de agua desde la zona urbana, y que probablemente aumentaron sus concentraciones progresivamente en el tiempo. Si bien no evidencia de acumulación en organismos en este momento, pueden ser acumulados en la biota acuática del ecosistema el algún momento futuro (Sadiq, 1992).

Se observó que los factores fisicoquímicos no fueron adecuados para que ocurra la movilidad y solubilidad de metales pesado presentes (Alloway, 1995). Los valores de pH en las muestras de sedimento de las cuatro zonas de la Laguna Manatí corresponden a condiciones neutras hasta ligeramente acidas. Según Sauquillo *et al.*, (2003), la movilización de metales pesados en suelos y sedimento está influenciada por el pH, potencial redox, capacidad de intercambio catiónico (iones), presencia de minerales carbonatados, materia orgánica y textura entre los más importantes. A condiciones ácidas (pH 3.0), la mayoría de elementos metálicos de importancia ambiental se encuentran en la fase de solución y disponible. Además, de la influencia que tiene el pH sobre la movilización y disponibilidad de los metales pesados, otros factores como la naturaleza de la contaminación, cambios en el potencial redox y fluctuación de temperatura, afecta la movilización y disponibilidad también. Según Alloway (1995), factores físicos (lavado, erosión etc.), que cambia la materia a su fase solida a liquida, son las principales causas de la movilización de metales pesados en suelos y sedimento.

El contenido de la materia orgánica presente en suelos y sedimento reacciona con metales formando complejos de cambio o quelatos. Por ejemplo, el elemento Cu, es fuertemente absorbido por la materia orgánica, de esta manera pueden ser totalmente estabilizado (Galán, 2000). En el caso de Pb y Zn, la materia orgánica puede formar quelatos muy estables con estos elementos, y en la mayoría de los casos, la materia orgánica forma complejos organometálicos con los metales pesados, que resulta en la solubilización del metal, con incremento en la disponibilidad y dispersión (Kabata- Pendias, 1995). En consecuencia, los iones de los metales se quedan en un estado disponible para microorganismos del suelo y sedimento, y fácil para absorber por parte de la vegetación presente. Esto significa que el riesgo potencial para el agua y los organismos acuáticos es bajo. En la zona oeste de Laguna Manatí, se reportaron las concentraciones más bajas de los metales analizados, con el contenido más alto de la materia orgánica (0.8%), presumiblemente por la formación de quelatos, que explica la presencia de estas bajas concentraciones. Por otra parte, en el canal de drenaje, se observaron las concentraciones más altas y la presencia de todos los metales analizados. El contenido de la materia orgánica fue 0.5% en esta zona, que posiblemente explica una baja formación de quelatos. Otro aspecto que hemos mencionado con anterioridad es que, en esta zona, existe una alta cantidad de descargas de aguas pluviales y desechos domésticos, con posibles contenidos de elementos metálicos que se convierte en la razón principal de la presencia de los metales pesados. El contenido de la materia orgánica en todas las zonas de Laguna Manatí fue baja, en comparación con otras lagunas costeras que contienen mayores contenidos de materia orgánica. Asumimos, que una

baja formación de complejos organometálicos o quelatos facilita la movilización o resuspensión a otras matrices, pero otros factores fisicoquímicos como pH, salinidad y las propiedades de redox deben que provocar esta actividad (Ruiz *et al.*, 1996).

Los valores de CIC de Laguna Manatí ayudan a explicar la baja presencia de los metales pesados especialmente en las zonas este, oeste y el norte de la Laguna Manatí. La capacidad intercambio catiónico (CIC), es una propiedad química que tiene las arcillas del suelo para retener e intercambiar cationes de calcio (Ca^{++}), magnesio (Mg^{++}), potasio (K^+), sodio (Na^+), hidrogeno (H^+), y amonio (NH_4^+), explica cómo influye el intemperismo mineral y la descomposición de la materia orgánica en el orden de intercambio de algunos metales de importancia ambiental, como Al^{3+} , Fe^{3+} y Mn^{2+} (Cheong *et al.*, 1995). La CIC es una medida de explicar la facilidad de intercambiar cationes entre los coloidales de materia y su entorno, o sea, una alta capacidad de intercambiar cationes, es un posible factor que el sistema radicular de la vegetación aprovecha de los cationes, que resulta en una baja presencia de cationes en el ambiente, en este caso metales en el agua o sedimento. Es conveniente continuar con investigaciones para identificar la acumulación o retención de metales en organismos vegetales.

3.7.2 Riqueza y abundancia

En cuestión de riqueza de la biota acuática analizada, los rotíferos del género *Lecane* mostraron una alta riqueza en las muestras colectadas. Fue posible identificar los rotíferos *Lecane bulla*, *L. cornuta*, *L. spinulifera*, *L. ludwigii*, *L. quadridentata*, *Brachionus ibericus*, *B. falcatus*, *Adineta vega*, *Testudinella patina*, donde en el canal de drenaje se comprobó la representación de todas las especies en las muestras de la biota acuática. Las especies que correspondieron a una alta abundancia en las cuatro zonas de Laguna Manatí también fueron los rotíferos del género *Lecane*. Esta especie está representada en el canal de drenaje, zona este (lugar de pescadores y visitantes de recreación) y la zona norte. Se considera como especies litorales, que habitan en el substrato del sistema acuático, pero se pueden encontrar también flotando o sobre plantas acuáticas sumergidas (Koste y Shiel, 1990; Kuczynska- Kippen, 2007).

Según previos estudios, la alta presencia de *L. bulla* en las secciones anteriormente mencionadas y la presencia de varios organismos zooplanctónicos, se puede atribuir a la variación de parámetros fisicoquímicos de salinidad, temperatura y diferentes niveles de nutrientes (Campillo *et al.*, 2011; Lowe *et al.*, 2007; Xiang *et al.*, 2017). El canal de drenaje, por recibir las escorrentías

pluviales de la zona urbana y alta presencia de plantas acuáticas, que funciona como sustrato para florecer y crecer, presento una alta biodiversidad de especies.

La segunda especie más abundante fue *Euglena viridis*, con una abundancia relativa de 43.7 %. Esta especie, *E. viridis*, frecuentemente se encuentran en charcos o pequeñas masas de agua, altamente contaminadas, como el canal de drenaje, y pueden vivir en aguas dulces, salobres y salinas. La identificación de *E. viridis*, solamente en el canal de drenaje, sugiere que, en esta sección, existe degradación ambiental y posibles condiciones de anoxia (Confortí *et al.*, 2005). La presencia de los ostrácodos (*Cypridopsis vidua*), se encuentra en las zonas el canal de drenaje y oeste de la laguna (sección de depósitos de sedimentos) posiblemente porque tiene una distribución amplia en el mundo. Su alimentación consiste de algas, cianobacterias, detritus, vegetación acuática, en específico, alga verde (*Chara fragilis*), (Roca *et al.*, 1993). La presencia de esta especie en estas secciones se debe posiblemente a la alta disponibilidad de alimentos, especialmente en el canal de drenaje, los parámetros ambientales adecuados y la posibilidad de refugiarse en las plantas acuáticas (*Eichhornia crassipes* y *Ceratophyllum submersum*). Las especies *Euglena viridis* y *Cypridopsis vidua* florecen y multiplican en los sistemas acuáticos dulces, además *C. vidua* se encuentran también en aguas saladas. Ambas tienen la capacidad de crecer en ambientes acuáticos polisaprobias (es decir, con influencia de agua residual), alto grado de turbiedad debido a la gran cantidad de partículas en suspensión y acumulación alta de material flotante en la superficie del agua. Los cuerpos de aguas estancados o de lento flujo como el canal de drenaje, presenta en los periodos secos una mayor agudeza, donde la intensidad de descomposición de la materia orgánica, es distinta, afectando la calidad de agua (Laprida *et al.*, 2004; Confortí *et al.*, 2005). Las sustancias resultantes se acumulan sobre el fondo del cuerpo de agua, en cantidades variables, donde sirven de alimento a los microorganismos, que se desarrollan rápidamente, hasta alcanzar gran abundancia. Parte de la materia orgánica depositada regresa al agua, donde se utiliza como fuente de nutrición para bacterias, hongos, algas unicelulares (*Euglena viridis*), ostrácodos (*C. vidua*), y demás organismos detritívoros (Confortí *et al.*, 2005). Dadas las concentraciones de metales en sedimentos, se esperaba haber detectado metales en zooplancton detritívoro y/o bentónico, pero no fue así.

De los copépodos, la especie *Eucyclops cf serrulatus*, está representada en todas las secciones de Laguna Manatí. Los copépodos han tenido éxito colonizando aguas dulces, forman una parte principal de plancton y pueden habitar en lagunas naturales o embalses recién construidos hasta suelos húmedos (Miracle, 2015). La representación de los copépodos en toda el área de estudio se atribuye posiblemente a su alta resiliencia y adaptabilidad a condiciones diferentes del

ambiente y a la disponibilidad de su alimentación. Por ejemplo, en el canal de drenaje y la zona oeste (mayores depósitos de sedimento) se encontraron una representación mayor en comparación con las otras secciones, presumiblemente por la mayor disponibilidad de alimentos (microalgas, protozoos e invertebrados acuáticos del plancton y de los bentos), la presencia de plantas acuáticas, detritus y el sedimento (Miracle, 2015). Los estudios sobre estos organismos, demuestran que la riqueza y la abundancia de los cladóceros (*Ceriodaphnia cornuta*) es elevada en zonas litorales con macrófitas flotantes (Rossa *et al.*, 2001; Lima *et al.*, 2003; Kotov y Stifter, 2006), como en nuestro caso, donde están presentes en la zona norte (antigua basurero de electrodomésticos). La especie *C. cornuta* vive en asociación con plantas acuáticas, sus especializaciones los permiten aprovechar de los recursos en la zona litoral, en específico las macrófitas. Además, tienen apéndices especializados para raspar y manejar el alimento (Fryer, 1995). Estos organismos anteriormente mencionados, aprovechan de las macrófitas en su dieta y usan las macrofitas como refugio contra la depredación de otras especies acuáticas (Pieczynska, 1990; Rossa *et al.*, 2001).

En cada comunidad de acuática se pueden presentar perturbaciones naturales o provocadas por acciones antropogénicas. En el caso de Laguna Manatí, los arrastres de aguas pluviales enriquecidas con desechos de la zona urbana, en específico, en la sección canal de drenaje, posiblemente han tenido un impacto sobre la riqueza y abundancia de las especies de zooplancton, que se explica porque, algunas están presentes en menor proporción, por ejemplo, *Lecane quadridentata* y *Testudinella patina*, en comparación con una especie en abundancia, *Lecane bulla* (Wallace *et al.*, 2006). Un caso específico, fue la construcción del canal de Panamá, para realizar una conexión entre el océano Atlántico y el mar Pacífico, fue construido con el objetivo de facilitar y acelerar el viaje de carga transportado en barcos. El resultado de esta masiva obra fue que una especie de rotífero, *Filinia camasca* Myers, 1938, muy conocida en la zona del canal de Panamá, desapareció, nunca más fue encontrada en las Américas. El efecto de una alteración puede provocar una competencia por nutrientes, oxígeno y espacio entre los organismos zooplanctónicos o una depredación de ciertas especies de rotíferos sobre otras (Dartnall, 2005; Wallace *et al.*, 2006).

En Laguna Manatí no hubo detección de metales pesados en agua y biota acuática, siempre estuvo por debajo de los límites de detección, es decir, en concentraciones muy bajas. Esto puede significar que los metales analizados en este momento no impactan negativamente la calidad del agua, y sugiere que, en un periodo corto, no ha habido asimilación de metales por la biota acuática desde el agua. Con respecto a los valores de nitratos y fosfatos que varían desde 1.70- 4.42 mg.

L⁻¹ y 0.01- 0.109 mg. L⁻¹, respectivamente (*datos no publicados*), los valores zona aceptable basado en criterios ecológicos de calidad de agua CE-CCA-001/89. Es decir, la biota acuática estudiada (rotíferos, ostrácodos, copépodos y cladóceros) no parece recibir impactos negativos. No obstante, la conectividad hidrológica de la Laguna Manatí con el sistema lagunar de Chacmochuch esta impactada (posiblemente reducida), por la construcción de las carreteras Avenida Bonampak y Avenida José López Portillo. Esta actividad antropogénica potencialmente limita la distribución de los organismos zooplanctónicos desde y hacia otros sistemas acuáticos.

3.7.3 Análisis de riesgo ambiental de la Laguna Manatí.

La evaluación ambiental por metales pesados en la Laguna Manatí mediante la obtención de la concentración ambiental (MEC) acorde a la metodología de Karlsson (2008) no se completó de la manera convencional, ya que la cuantificación de los metales pesados en el agua estuvo por debajo de los límites de detección. Comparando los valores de los límites de detección teóricos de los metales pesados en agua se presentan estimaciones de riesgo ambiental (RQ) como un posible escenario, considerando el valor experimental de los metales analizados en agua (Tabla 19). En todos los estudios documentados en la Tabla 19, donde se presenta concentraciones de metales pesados en el agua, el factor principal de aportación fue la intervención o contribución de acciones antrópicas.

Frecuentemente se reportan concentraciones elevadas de metales en zonas donde las actividades que prevalecen son aplicación de agroquímicos y fertilizantes, explotación petrolera, actividad turística o recreación acuática, vertimientos de contaminantes por descargas industriales y las emisiones por transporte que utiliza combustibles fósiles (Aguilar y Amador, 2003; García- Bucio *et al.*, 2008; Arcega-Cabrera *et al.*, 2015; Tun-Canto *et al.*, 2017). En este estudio en la Laguna Manatí, no se detectaron metales en agua y zooplancton, solo en sedimento. La razón puede ser el constante depósito de los metales del agua a los sedimentos (Mora *et al.*, 2006). Es importante mencionar que Laguna Manatí está rodeada de la zona urbana de Cancún, que por su crecimiento irregular y el interés del turismo acuático que incremento en las últimas décadas, ha incrementado la descarga de contaminantes, que se han ido acumulando en los sedimentos principalmente (Padilla, 2015; Barrios, 2019). Otros factores que favorecen la acumulación de elementos hacia los sedimentos son los factores fisicoquímicos pH, salinidad y potencial redox del sistema, el tamaño de las partículas por que el sedimento este constituido (limo, arcilla y arena), además la cantidad de la materia orgánica sedimentaria que alternan el

equilibrio ecológico y biogeoquímico del ecosistema, que puede mover los elementos hacia el sedimento (Acosta *et al.*, 2002).

Tabla 19. Evaluación del umbral de riesgo ambiental (RQ) según Karlsson (2008) con MEC teórico de la Laguna Manatí (agua) y PNEC previamente reportados. PNEC= CL50/1000. RQ= (MEC/ PNEC).

Metal	MEC (mg L⁻¹)	PNEC (mg L⁻¹)	RQ	Evaluación	Referencias
Al	0.014	0.000157	89.17	Riesgo ambiental alto	Torres- Guzmán <i>et al.</i> , 2010
Ba	0.002	-----	-----	-----	-----
B	0.0026	-----	-----	-----	-----
Co	0.003	-----	-----	-----	-----
Cu	0.014	0.00033	42.42	Riesgo ambiental alto	Pérez- Legaspi y Rico-Martínez, 2001
Cr	0.0036	0.00045	8	Riesgo ambiental moderado	Pérez- Legaspi y Rico-Martínez, 2001
Fe	0.0023	0.00053	4.3	Riesgo ambiental moderado	Torres- Guzmán <i>et al.</i> , 2010
Mn	ND	0.0386	-----	-----	Mejía- Saavedra <i>et al.</i> , 2005
Ni	0.007	-----	-----	-----	-----
Pb	0.021	0.00356	5.9	Riesgo ambiental moderado	Pérez- Legaspi y Rico-Martínez, 2001
Zn	0.0024	0.000123	19.51	Riesgo ambiental alto	Torres- Guzmán <i>et al.</i> , 2010

Según Tun-Canto *et al.*, (2016), las concentraciones de metales varían por cambios de las corrientes de agua, con excepción si existe una fuente significativa de aportación (descargas de aguas industriales, fertilización y plaguicidas) de metales pesados a los sistemas hídricos. En el caso de la Laguna Manatí, las escorrentías superficiales que provienen de la localidad Puerto Juárez en el este, las aguas pluviales de la colonia Vicente Lombardo Toledano en el sur y los lixiviados generados de los aparatos electrónicos, no han dejado concentraciones significantes para ser detectados en el agua de la laguna, pero si en los sedimentos. Las escorrentías y las

aguas pluviales que terminan en el cuerpo de agua de la Laguna Manatí, son los únicos flujos hídricos que posiblemente aportan concentraciones de metales pesados al área de estudio. El riesgo de contaminación ambiental por metales en la biota acuática es actualmente es insignificante.

Del punto de vista litológico, los elementos Al y Fe, aunque mostraron valores que se clasifican como riesgo ambiental alto y moderado, no se consideran como elementos potencialmente tóxicos, por el hecho de que forman parte del material de la corteza terrestre. Estos elementos son considerados como trazadores para estudiar de la roca madre cuales procesos geomorfológicos estimulan su mineralización, disponibilidad y transformación en un sistema. Se necesitan resultados de estudios multianuales para mostrar que la concentración de estos elementos en el medio ambiente proviene de fuente natural o antropogénico (Abramson, 1996).

El resultado del riesgo ambiental para el elemento Zn fue alto. El elemento de Cu, mostro un valor que se clasifica como riesgo alto. Éste elemento forma complejos organometálicos, lo que implica que su toxicidad y disponibilidad se reduce. En el caso donde los colectores de basura queman los aparatos electrónicos en su búsqueda de este elemento, se liberan concentraciones importantes por lixiviados al sistema, lo que puede representar peligro para el medio biofisico de la zona de estudio (Barrios, 2019). En el caso del elemento Cr, presentó un riesgo moderado; sin embargo, debemos que considerar que, si el cromo ocurre en la forma del cromo hexavalente, puede formar un riesgo grave al sistema de la Laguna Manati, por sus características de ser más tóxico y agresivo en comparación al cromo III (Connett y Wetterhahn, 1983; De Flora *et al.*, 1990). El elemento Zn, presentó un riesgo ambiental calculado alto, con la información de la literatura y los límites de detección en agua del instrumento, que está considerado como una aproximación, con variaciones de la hidrodinámica del sistema acuático.

Es difícil conocer el origen de los metales detectados en las muestras de sedimento, posiblemente llegaron a la matriz ambiental por descargas de aguas pluviales y desechos de residuos de electrodomésticos, esto fue nuestra observación después de múltiples visitas al área de estudio. El gradiente hidráulico de la Península de Yucatán sugiere flujo preferencial del agua subterránea del oeste hacia este, desde tierra adentro terminando en la zona costera de la Península (INEGI, 2010; PMPMS, 2014; Leal- Bautista *et al.*, 2019). Como la formación geológica de la Península de Yucatán es un sistema kárstico permeable, significa que todas las actividades antropogénicas pueden influir la calidad del agua. Asumimos que los metales posiblemente llegaron por los flujos superficiales enriquecidos en contaminantes por actividades humanas en la zona urbana que

rodean la Laguna Manatí. Un estudio del flujo superficial en la zona urbana cerca de la Laguna Manatí (Llaguna- Gilberto et al., 2016), generó un Modelo Digital de Elevaciones que señaló que la colonia de Vicente Lombardo Toledano mostró una mayor vulnerabilidad a ser afectadas por las lluvias inusuales dada la urbanización de la zona y el uso de suelo, que generó una capa impermeable que trae como consecuencia una generación de encharcamientos e inundaciones que drenan hacia la parte este, donde la Laguna Manatí está ubicada. La entrada de drenaje pluvial por esta forma es muy probablemente una contribución importante de partículas y contaminantes, razón por la cual se encuentran fundamentalmente en el canal de drenaje.

En el estado de Quintana Roo, hay reportes sobre concentraciones de elementos potencialmente tóxicos (Cd, Cu, Fe y Hg) en sedimento, causadas por actividades antropogénicas (fertilización y aplicación de agroquímicos), en la zona cañera de la cuenca del río Hondo, Quintana Roo (Tun-Canto *et al.*, 2016). En la bahía de Chetumal se encontraron concentraciones más elevadas de elementos potencialmente tóxicos (As, Cd, Hg y Pb) en la temporada de lluvia, posiblemente por el efecto de escurrimiento durante las aguas pluviales, y la mezcla de material suspendida en la columna de agua con la lluvia, que después son transportados a estos sitios (González- Bucio *et al.*, 2006) (Tabla 20).

El metal Ba no se considera como metal cancerígeno, tóxico y con potencial riesgo ambiental, además se encuentra ampliamente distribuida en la corteza terrestre y proviene en la roca madre en distintas formas, por ejemplo, los más comunes sulfato de bario y carbonato de bario (insoluble en agua). Los otros compuestos de Ba, (cloruro de bario, nitrato de bario e hidróxido de bario), son fácilmente solubles en agua (ATSDR, 2008). El aire contiene concentración de $0.00015 \text{ ng g}^{-1}$ de Ba, mientras que los pozos de las aguas subterráneas en muchos casos sobre pasan los límites máximos permisibles de 2 mg L^{-1} (US EPA, 2013). Se recomienda monitorear la exposición de Ba, por el riesgo potencial de afectar la salud humana (ATSDR, 2008).

Tabla 20. Contenidos promedios de metales pesados en sedimento en estudios previos de México y en Quintana Roo. Metales expresados en mg/Kg.

Sitio	Uso principal	Al	As	Ba	B	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Hg	Mn	Ni	Pb	Zn	Referencias
Campeche Shelf, México	Conservación	-	-	-	-	0.00 11	-	0.06 1	-	-	-	-	-	0.0 34	-	Macías-Zamora <i>et al.</i> , 1999
Río Chumpan, Campeche	Zona ribereña,	-	-	-	-	0.00 3	-	0.00 4	-	-	-	-	-	-	-	Aguilar y Amador, 2003
Río Candelaria, Campeche	Importancia hídrica, turismo	-	-	-	-	0.00 2	-	0.00 39	-	-	-	-	-	-	-	Aguilar y Amador, 2003
Costa Central Telchac, Yucatán, México	Zona costera	-	-	-	-	0.00 23	-	-	-	-	-	-	-	0.0 15	-	Medina-González <i>et al.</i> , 2004
Costa Poniente, Celestún, Yucatán	Actividad pesquera	-	-	-	-	0.00 23	-	0.00 45	-	-	-	-	-	0.0 20	-	Medina-González <i>et al.</i> , 2004
Bahía Chetumal, Laguna Guerrero, Quintana Roo	Recreación, actividad petrolera	-	-	-	-	0.00 15	-	-	-	-	-	-	-	0.0 23	-	García - Ríos y Gold-Bouchot <i>et al.</i> , 2004
Bahía Chetumal, Laguna Guerrero, Quintana Roo	Recreación	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	23	-	García - Ríos y Gold-Bouchot <i>et al.</i> , 2005
Bahía Campeche, México	Recreación	-	-	-	-	0.00 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Vázquez - Gutiérrez <i>et al.</i> , 2006
Bahía Chetumal	Zona costera	-	0.6 3	-	-	1	-	-	-	-	2.2 5	-	-	5.6 3	-	González - Bucio <i>et al.</i> , 2008
Costa Central-Telchac, Yucatán	Zona costera	-	-	-	-	2.18	-	-	-	-	-	-	-	0.0 22	-	Canedo-López <i>et al.</i> , 2014
Laguna Chelem, Yucatán	Recreación, investigación.	-	-	-	-	0.15	-	0.02 8	-	-	-	-	-	0.0 4	-	Arcega-Cabrera <i>et al.</i> , 2015
Cuenca de Río Hondo, Quintana Roo	Producción agrícola	-	-	-	-	0.54	-	-	8	1995 2.2	64	-	-	-	-	Tun-Canto <i>et al.</i> , 2017
Laguna Manatí (Canal de	Zona urbana	75 56. 54	-	9.1 6	-	-	0.1 1	5.5	29	1086 .27	-	12. 6	3.0 3	1.1 5	13 33	<i>Este estudio</i>

drenaje), Quintana Roo Laguna Manatí (Zona Este), Quintana Roo Laguna Manatí (Zona Oeste), Quintana Roo Laguna Manatí (Zona Norte), Quintana Roo	Área natural protegida	14 5.3 1	-	5.6	19. 8	-	-	-	3.3 4	17.4 7	-	-	0.6 7	-	23 6	<i>Este estudio</i>
	Área natural protegida	11 21. 89	-	5.6 2	-	-	-	-	3.5 4	17.4 7	-	-	0.2 2	-	66. 4	<i>Este estudio</i>
	Área natural protegida	19 0.8 4	-	3.7 6	-	-	3.29	-	51.2 3	-	-	-	0.4 9	-	13 0	<i>Este estudio</i>

El B, encontrado en sedimentos, se clasifica como elemento no metálico o semi-metal, esencial como micronutriente en la funcionalidad ósea, pero también muy importante en la formación y estabilización de la estructura celular de las plantas, y como regulador metabólico en los tejidos animales y de plantas (Crespo, 2001). En la naturaleza se encuentra en la roca madre, suelo y agua, y aunque han registrado cantidades de ingestión de 50 g en humanos, se ha establecido la dosis fatal de 3- 4 g en adultos, y 1 g en los niños (Dixon *et al.*, 1976). Por la dieta posiblemente ingerimos aproximadamente $0.38 \text{ mg kg}^{-1} \text{ día}^{-1}$, una concentración muy baja para producir enfermedades, aunque no parece haber significantes riesgos ecológicos, debemos monitorear las fuentes de boro y nuestra ingesta para no tener situaciones adversas en la salud (Wegman *et al.*, 1994; Whorton *et al.*, 1994).

En estudios realizados en áreas naturales protegidas, los factores de enriquecimiento e índices de geoacumulación se han basados en relación del contenido del metal examinado y su valor basal, donde han encontrado resultados satisfactorios para la evaluación de la contaminación por metales en suelos y sedimento (del Águila-Juárez *et al.*, 2005; Cieslewicz *et al.*, 2017; Mazurek *et al.*, 2017). Para la determinación de los factores de enriquecimiento (FE) y los índices de geoacumulación (*Igeo*), implementamos los valores basales según Turekian y Wedepohl (1961). En las cuatro zonas, el elemento Zn presentó un enriquecimiento muy alto, con valores de 604.40 a 1431.56, en la zona este (zona con alta frecuencia de pescadores y visitantes), y los valores menores fueron en la zona del canal de drenaje, 85.23 a 364.72. En el caso de los índices de geoacumulación, el elemento Zn, correspondió a valores elevados en el canal de drenaje (3.5-6.5), y en la zona este con valores menores de -0.8 a 1.5. El elemento Zn, por sus altos factores

de enriquecimiento y elevados índices de geoacumulación, puede causar riesgos ambientales graves para la Laguna Manatí.

Comparando los valores de los factores de enriquecimiento, del estudio que se realizó en el Río Lerma (Estado de México), se observó que, únicamente el metal Pb, presentó valores por encima de 10, que indicó, que este metal fue moderadamente enriquecido en el suelo por acciones antropogénicas (Lawson y Winchester, 1979), posiblemente por las descargas de las aguas industriales. En nuestro estudio, los valores de enriquecimiento de los metales Ba, B y Cu en las zonas este (actividad pesquera), oeste (depósitos de sedimento) y el norte (antiguo basurero de aparatos electrónicos), se encontraron por arriba de 10. Todos los otros metales pesados (Co, Cr, Fe, Mn, Ni, Pb) presentaron valores de enriquecimiento por debajo de 10, significa que están cerca de su valor basal (Lawson y Winchester, 1979; Cazares, 2013). Además, se destacó, que el metal Zn, en todas las cuatro zonas se reportan valores de enriquecimiento elevados, entre 85.23 y 1431.56.

Con respecto a los índices de geoacumulación de este estudio, el elemento B se encuentra en la clasificación de no contaminado a moderadamente contaminado ($0 < I_{geo} < 1$), y el Cu en el grupo de moderadamente contaminado ($1 < I_{geo} < 2$). Según Alloway (1990), los valores de enriquecimiento de Cr, Cu y Zn se relacionan con actividades antropogénicas. Laguna Manatí, está rodeada por la mancha urbana y rodeada por las vialidades principales Avenida Bonampak y la Avenida José López Portillo. Los enriquecimientos de los metales Cu y Zn con valores arriba de 10 provienen posiblemente de los residuos de los materiales como cables de electricidad, laminas galvanizadas, lubricantes o emisiones de los vehículos y la pintura de la construcción de viviendas, entre otras, transportados por el drenaje o por los escurrimientos.

La diferencia entre *FE* e *I_{geo}* es posiblemente por la diferencia en actividad antropogénica que se desarrolla en cada sección de la Laguna Manatí. En la zona este de Laguna Manatí, los factores de enriquecimiento (*FE*) en los metales encontrados (Cu y Zn) son mayor de 10, que significa que estos elementos son enriquecidos por actividades humanas, con origen probable en la actividad de flota pesquera, recreación acuática, emisiones de combustibles fósiles y desechos de láminas galvanizadas. En el canal de drenaje, presentan valores mayores de *I_{geo}* en comparación con las otras secciones, mayor de 2, que significa una geoacumulación de metales proveniente de fuentes antropogénicas, en este caso escurrimientos de la zona urbana, desechos de construcción, alambres y cables eléctricos.

En el canal de drenaje se observó que el potencial de riesgo ecológico (RI) es mayor (378.72) que las otras secciones de la Laguna Manatí, y que el metal de Zn contribuye 87% al total al potencial de riesgo ecológico. Según los estudios previos (Guo *et al.*, 2010; Wu *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2020) el potencial de riesgo ecológico se deriva del total de contaminación ocasionado por aportaciones de actividades humanas, y en el caso del canal de drenaje, el valor de potencial de riesgo ecológico posiblemente se atribuye a fuentes de la zona urbana como escurrimientos de las aguas pluviales que terminan en el canal de drenaje. Otros autores señalen que los depósitos atmosféricos a los sistemas acuáticos son fuentes principales de los metales Pb, Cr, Zn y Ni, que posteriormente por procesos de oxidación-reducción, pH, contenido de materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico del material pueden terminar en el sedimento (Wang *et al.*, 2020).

4. CONCLUSIONES

Los parámetros fisicoquímicos de las muestras de sedimento (pH, contenido de materia orgánica y capacidad intercambio catiónico), no presentaron valores que facilitan la movilización y disponibilidad de los elementos metálicos, desde los sedimentos hacia el agua o la biota acuática estudiada.

La evaluación ambiental de contaminación de agua y biota acuática (zooplancton) por metales pesados es buena, por el hecho que las concentraciones cuantificadas de los metales pesados analizados se encontraron inferiores a los límites de detección, por lo que estuvieron debajo la normatividad mexicana NOM- 001- SEMARNAT-1996 (protección biota acuática y humedales).

Con respecto al sedimento de la laguna, se observaron altas concentraciones de 10 metales (Al, Ba, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb y Zn), en el canal de drenaje en comparación de las otras zonas del sistema acuático Laguna Manatí. Los metales Al y Zn, encontrados en las muestras de sedimento, mostraron valores promedios por encima de valores de referencias, que indican que existe un potencial de riesgo ambiental para los organismos que habitan Laguna Manatí.

Los factores de enriquecimiento (FE) y los índices de geoacumulación (I_{geo}) en las muestras de sedimento mostraron que el elemento Zn tiene concentraciones altas en las cuatro zonas del área de estudio, que implica un alto potencial de riesgo ambiental en esta zona de la laguna.

No se reporta bioacumulación de metales en la biota, por lo tanto, no hay evidencia de biomagnificación de metales en el presente estudio, usando especies de zooplancton como indicadoras de calidad de agua.

El potencial de riesgo ecológico (RI) se reportaron valores por debajo de 150, en la zona este, oeste y el norte de Laguna Manatí para todos los metales pesados, con excepción, del Zn. En el canal de drenaje el RI fue de 378.72, donde el Zn contribuyó un valor de 333.30 al total. El RI en el canal de drenaje corresponde a un intervalo de potencial de riesgo ecológico relativamente alto, con graves implicaciones para los organismos bentónicos y la población.

Referencias

- Abramson L.W. (1996) Engineering geology Principles- Slope stability and stabilization methods. Wiley-interisc. 60-106.
- Acosta, V., Lodeiros, C., Senior, W., Martínez, G. (2002) Niveles de metales en sedimentos superficiales en tres zonas litorales de Venezuela. *Interciencia*. 27 (12), 386-690.
- Adachi, K., Tainosho, Y. (2004) Characterization of heavy metal particles embedded in tire dust. *Environ. Int.* 30 (8), 1009-1017.
- Agency for Toxic Substance and Disease Registry (ATSDR) (2004) Resumen de salud pública Cobalto, 1-12.
- Agency for Toxic Substance and Disease Registry (ATSDR) (2008) Barium and Barium compounds, 1-8
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR) (1999) Public Health Service. Atlanta: U.S. Department of Health and Human Services. Toxicological Profile for Lead.
- Aguilera, A., Armendariz, C., Quintana, P., García-Oliva, F., Bautista, F. (2004) Influence of land use and road type on the elemental composition of urban dust in a mexican metropolitan area. *Pol. J. Environ.Stud.* 28(3),1535-1547. <https://doi.org/10.15244/pjoes/90358>
- Aguilar C.A., Amador del Ángel L.E. (2003) Metales pesados en el ostión (*Crassostrea virginica*) de la laguna de Términos, Campeche, México. [on line]. <http://www.geocities.com/leamador/Marcuba2003.pdf>>. 06/08/2009.
- Al-Khashman, O.A., (2004) Heavy metal distribution in dust, street dust and soils from the work place in Karak Industrial Estate, Jordan. *Atmos. Environ.* 38 (39),6803-6812.
- Alloway, B.J. (1995) Heavy metals in soils. Springer Netherlands. Segunda edición, pp. 1- 368.
- Alvarado-Flores, J., Rubio-Franchini, I., Sánchez- Ávila, A. S., Ramírez- Tlalolín, G.J., Rico-Martínez, R. (2019) Arsenic toxicity, bioaccumulation and risk assessment: A case study in Tolimique Dam, Aguascalientes, Mexico. *Cog. Environ. Sc.* 5(1), 165063.
- Amoyaw-Osei, Y., Agyekum-Opoku, O., Pwamang, J.A., Mueller, E., Fasko, R., Schlupe, M. (2011) Ghana e-waste Country Assessment. *J. Mater. Sci.Technol.* 58-59.
- Andrade-Gómez, L., Rebolledo-Vieyra, M., Andrade, J.L., Lopez, P. Z., Estrada- Conteras, J. (2019) Karstic aquifer structure from geoelectrical modelling in the Ring of Sinkholes, Mexico. *Hydrogeo. J.*, 27 (7), 2365-2376.
- Arcega-Cabrera, F. Garza-Pérez, R., Noreña-Barosso, E., Ocegüera-Vargas, I. (2015) Impacts of Geochemical and Environmental Factors on Seasonal Variation of Heavy Metals in a Coastal Lagoon Yucatan, México. *Bull. Environ. Cont. Toxicol.* 94 (1), 58-65.
- Arcega-Cabrera, F., Noreña-Barroso, E., Ocegüera-Vargas, I. (2014) Lead from hunting activities and its potential environmental threat to wildlife in a protected wetland in Yucatán, México. *Eco. Environ. Saf.* 100(1), 251-257. doi:10.1016/j.ecoenv.2013.11.002.
- Arcega-Cabrera, F., Fargher, L., Quesadas-Rojas, M., Moo-Puc, R., Ocegüera-Vargas, I., Noreña-Barroso, E., Pérez-Medina, S. (2018) Environmental exposure of children to toxic trace elements (Hg, Cr, As) in an urban area of Yucatán, México: *Water, blood, and urine levels*. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 100 (5), 620-626. doi:10.1007/s00128-018-2306-8.
- Arnot, J.A., Gobas, F. A.P.C. (2006) A review of bioconcentration factor (FBC) and bioacumulation factor (FBA) assessments for organic chemicals in aquatic organisms. *Environ. Rev.* 14, 257-297.
- Barrios, M. (2019) Corrupción: Sale a la luz reventa de zona de conservación en Cancún. Artículo de la Prensa Quinta Fuerza, martes 8 de enero del 2019. <https://quintafuerza.mx/quintana-roo/corrupcion-sale-a-la-luz-reventa-de-zona-de-conservacion-en-cancun/>

- Boeni, H. Silva, U. Ott, D. (2008) E-Waste Recycling in Latin America: Overview, Challenges and Potential. Proceedings Article, Global Symposium on Recycling, Waste Treatment and Clean Technology, Cancún, México.
- 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 pp.
- Calderón-Maya, J. R., Campos- Alanís, H., Rosas- Ferrusca, F.J. (2014) Contaminación ambiental del sistema lagunar de Nichupté (Cancún- México). Congreso Nacional del Medio Ambiente, 1-27.
- Calva B.I.G., del Rocío- Torres A. M. (2003) Metales pesados y sus efectos en organismos. Laboratorio de Ecosistemas Costeros. Departamento Hidrobiología, U. A. M., 51,33-42.
- Campbell, Kurt M., Campbell, K. M., Gullede, J., McNeill, J. R., Podesta, J., Ogden, P., Fuerth, et al. (2007) The age of consequences: The foreign policy and national security implications of global climate change. CSIS Washington DC.
- Campillo, S., García-Roger, E. M., Carmona, M. J., Serra, M. (2011) Local adaptation in rotifer populations. *Evolut. Ecol.* 25,933-947. <https://doi.org/10.1007/s10682-010-9447-5>
- Canedo-López, Y., Ruiz- Marin, A., Chi- Ayil, J.C. (2014) Diagnóstico de la contaminación por metales pesados en sedimento superficial de la Laguna de Términos, Campeche: Una aproximación estadística. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica.* 7 (2), 95-104.
- Caramujo, M.J. (2015) Orden Harpacticoida IDE. numero 91^a, 1- 12.
- Carbajal, N. (2009) Hidrodinámica y transporte de contaminantes y sedimentos en el sistema Lagunar de Nichupté- Bojórquez, Quintana Roo. Instituto Potosino de Investigación Científica, A.C. Informa final SNIB- CONABIO proyecto No. CQ063. México D.F.
- Caso, M., Pisanty, I., Ezcurra, E. (2004) Diagnóstico ambiental de Golfo de México. 2, 493 p.
- Castro, G., Valdés, J. (2012). Concentración de metales pesados (Cu, Ni, Zn, Cd, Pb) en la biota y sedimento de unas playas artificial, en la bahía San Jorge 23o S, norte de Chile. *Lat. Am. J. Aquat. Res.* 40 (2), 267-281.
- Cazares, J. L. Q. (2013) Determinación de factores de enriquecimiento e índices de geoacumulación de plomo, cadmio y níquel en suelos agrícolas del sector San Alfonso en Machachi, Ecuador. Tesis de Licenciatura. Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- Chapman, P.M. (2007) Determining when contamination is Pollution-Weight of Evidence determinations for sediments and effluents. *Environ. Int.* 33, 492-501.
- Chavance, Y. (2012) Definition of Plankton. *Tara Oceans*. Disponible en: <http://oceans.taraexpeditions.org/en/tara-sciences-1-definition-of-plankton.php?id>
- Chen, T.L., Wise, S.S., Kraus, S., Shaffiey, F., Levine, K., Thompson, D.W., Romano T., O'Hara T., Wise J.P. (2009) Particulate hexavalent chromium is cytotoxic and genotoxic to the North Atlantic right whale (*Eubalaena glacialis*) lung and skin fibroblasts. *Environ. Mol. Mutag.* 50, 387-393.
- Chennaiaha, J.B., Rasheed, M.A., Patil, D.J. (2014) Concentration of heavy metals in drinking water with emphasis on human health. *IJPAES.* 4 (2), 205-214.
- Cheong, S.R., Choi, J.K., Yoshida, K., Lee, B.Y. (1995) Complementary DNA cloning and sequencing of the coat protein gene of Potato Virus Y-Ordinary Korean strain. *Korean J. Pl. Path.* 11, 73-79.
- Chowdhury, S., Mazumder, M.A. J., Al-Atta, O., Husain, T. (2016) Heavy metals in drinking water: Occurrences, implications, and future needs in developing countries. *Sci. Tot. Environ.* 569,476-488.
- Cieslewicz, J., M., Kobierski, M., Cichosz. (2017) Geochemical assessment of lake sediments in protected areas in Poland – a search for reference condition, *J. Lim.* 77 (1), 35-45.

- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2015) Situación del Subsector Agua Potable, Drenaje y Saneamiento. México D.F.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2016) Estadísticas del Agua en México. Edición 2016.
- CONANP (2014) Áreas protegidas decretadas. En: http://www.conanp.gob.mx/que_hacemos/ Consultada el 8 de abril de 2014.
- Concalves, E., Boaventura, R., Mouvet, C. (1990) Sediments and aquatic mosses as pollution indicators for heavy metals in the Ave river basin, Portugal. *Sci. Total Environ.* 114, 7-24.
- Confortí, V., Lionard, M., Segura, M., Rojo, C. (2005) Las Euglenófitas en las tablas de Daimiel como ejemplo de las limitaciones de los indicadores biológicos de la degradación ambiental. *AJBM.* 62 (2), 163-179.
- Connett, P.H., Wetterhahn, K.E. (1983) Metabolism of carcinogenic chromate by cellular constituents. *Struct. Bond.* 54, 93-124.
- Cortés, J.L., Bautista, F., Quintana, P., Aguilar, D., Goguichaishvili. (2015) The color of urban dust as an indicator of contamination by potentially toxic elements: the case of Ensenada, Baja California, Mexico. *Rev. Chapingo Ser. Cienc. For. Ambiente.* 21 (3), 255-266.
- Crespo E. (2001) El boro, elemento nutricional esencial en la funcionalidad ósea. *Rev. Española Cirug. Osteo articular,* 36 (206), 88-95.
- Dartnall, H. J. G. (2005) Are Antarctic planktonic rotifers anthropogenic introductions? *Quekett J. Microsc.* 40, 137-143.
- Dassenakis, M.; Scoullou, M., Gaitis, A. (1997) Trace metals transport and behavior in the Mediterranean estuary of Acheloos River. *Mar. Pollut. Bull.* 34 (2), 103-111.
- Davis, J.R. (2001) Aluminum and aluminum alloys. *ASM Specialty Handbooks, Serie III.* ASM International, U.S.A.
- De Flora, S., Bagnasco, M., Serra, D., Zanacchi, P. (1990) Genotoxicity of chromium compounds: a review. *Mutat. Res.* 38, 99-172.
- De Forest, D.K., Brix, K.V., Adams, W.J. (2007) Assessing metal bioaccumulation in aquatic environments: the inverse relationship between bioaccumulation factors, trophic transfer factors, and exposure concentration. *Aquat. Toxicol.* 84, 236-246.
- Dekov, V.M., Araujo, F., Van Grieken, R., Subramanian, V. (1998) Chemical composition of sediments and suspended matter from the Cauvery and Brahmaputra rivers (India). *Sci. Total Environ.* 212, 89-105.
- del Águila- Juárez, P., Lugo de la Fuente, J., Vaca-Paulín, R. (2005) Determinación de factores de enriquecimiento y geoacumulación de Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn en suelos de la cuenca alta del río Lerma. *Rev. Cient. Multidis. UAEMex.* 12 (2), 155-161.
- Diario Oficial Federal (DOF). (1999) Decreto por el que se declara área natural protegida la región denominada Laguna Manatí, con la categoría de zona sujeta a conservación ecológica ubicada en el municipio de Benito Juárez, Quintana Roo por el Gobernador Licenciado Díaz, J.E.H.
- Elías Gutiérrez, M., Suárez Morales, E., Gutiérrez Aguirre, M.A., Silva Briano, M., Granados Ramírez, J. G., Garfias Espejo, T. (2008) Cladóceras y Copépodos de las Aguas Continentales de México. Estado de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Flores, C.M., Del Angel, E., Frías, D.M., Gómez, A.L. (2018) Evaluación de parámetros fisicoquímicos y metales pesados en agua y sedimento superficial de la Laguna de las Ilusiones, Tabasco, México. *Tecnol. y Cienc. del Agua.* 9 (2), 1-19.
- FONATUR (2014) Programa de Desarrollo Urbano Del Centro de Población Cancún, Municipio Benito Juárez, Quintana Roo (2014-2030).
- Förstner, U., Wittman, G.T.W. (1981) *Metal Pollution in the Aquatic Environment.* 2nd Edition, Springer-Verlag, Berlin, 486 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-69385-4>

- Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., D'Elia, M., Paris, M. (2002) Protección de la calidad del agua subterránea guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales. Groundwater Management Advisory Team (GW - MATE). Mundiprensa, México. 118 p.
- Fryer, G. (1995) Phylogeny and adaptive radiation within the Anomopoda: a preliminary exploration. *Hydrobiol.*, 307, 57-68.
- Galán, E. (2000) The role of clay minerals in removing and immobilising heavy metals from contaminated soils. En: Proceeding of 1st Latin American Clay Conference, 1 (1): 351-361. Funchal, Portugal.
- Gold-Bouchot, B.G., Zapata, O. (1995) Análisis de Resultados del Programa: evaluación de la contaminación del agua en los litorales del Golfo y Mar Caribe de México. CINVSTAV-IPN Unidad Mérida.
- Gold- Bouchot, G., Zapata- Pérez, O., Rodríguez- Fuentes, G., Ceja- Moreno, V., del Rio- García, M., Chan- Cocom, E. (2006) Biomarkers and pollutants in the Nile Tilapia, *Oreochromis niloticus*, in four lakes from San Miguel, Chiapas, Mexico. *Int. J. Environ Poll.* 26 (1), 129-141.
- González-Bucio, J.L., Carrión-Jiménez, J.M., Yam-Gamboa, O., Díaz-López, C. (2006) Contaminación de la Bahía de Chetumal por metales pesados, materia orgánica y nutrientes producidos por las descargas de aguas residuales municipales. *Caos Conciencia.* 5, 5-11.
- Grael-Castro, E.; Pacheco Medina, A.; Coronado Peraza, V. (2008) Origen de los sulfatos en el agua subterránea del sur de la sierrita de Ticul, Yucatán *Ingeniería.* 13 (1), 49-58.
- Grael-Castro, E., García- Gil, G. (2010) Geología. En *Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán.* Duran R. y M. Méndez (Eds.). CICY, PPD-FMAM, CONABIO, SEDUMA. Capítulo 1, Contexto Físico, 496 p.
- Guo, W., Liu, X., Liu, Z., Li, G. (2010) Pollution and potential ecological risk evaluation of heavy metals in the sediments around Dongjiang Harbor, Tianjin. *Procedia Environ. Sci.* 2, 729-736.
- Gupta, N., Khan, K., Santra, S.C. (2008) An Assessment of Heavy Metal Contamination in Vegetables Grown in Wastewater- irrigated Areas of Titagarh, West Bengal, India. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 80, 115-118.
- Gutiérrez, R. (2008) Compilation and Production of a Karst map of Mexico. AGU Fall Meeting Abstracts, H21D-0854.
- Gutiérrez-Galindo, E.A., Villaescusa-Celaya, J.A., Arreola-Chimal, A. (1999) Bioacumulación de metales en mejillones de cuatro sitios selectos de la región Costera de Baja California. *Cienc. Mar.* 25 (4), 557-578.
- Hakanson, L. L. (1980) An ecological risk index aquatic pollution control, a sedimentological approach, *Water Res.* 14 (8), 975-100.
- Hamelink, J.L. Landrum, P.F. Harold, B.L. William, B.H. (1994) *Bioavailability: Physical, Chemical, and Biological Interactions.* Boca Raton, FL: CRC Press Inc.
- Hanim-Ismail, A., Azrin- Zaidin, S. (2015) A comparative study of zooplankton diversity and abundance from three different types water body. 2nd International Conference on Agriculture, Environment and Biological Sciences (ICAEBs'15), 16-17.
- Hargreaves, L.A., Whiteside, P.D., Grant Gilchrist, G. (2011) Concentrations of 17 elements, including mercury, in the tissues, food and abiotic environment of Arctic shorebirds. *Sci. Total Environ.* 409, 3757-3770.
- Herrera-Silveira, J. (2006) Lagunas costeras de Yucatán (se México): Investigación, diagnóstico y manejo. *ECOTROPICOS.* 19(2), 94-108.
- Herrera-Silveira, J., Morales- Ojeda, S.M. (2018) Subtropical Karstic Coastal Lagoon Assessment, SE Mexico: The Yucatan Peninsula Case, Ch. 13 En Kennish, M.J. and

- Paerl, H.W. eds., 2010. Coastal lagoons: critical habitats of environmental change. CRC press.
- Hita-González, L. (2000) Dinámica de los contaminantes infiltrados en el acuífero kárstico de Cancún, Quintana Roo. 1st Joint World Congress on Groundwater.
- Holmes, J.A. (2001) Ostracods. In: Smol J.P., Birks H.J.B., Last W.M. (eds) Tracking environmental change using lake sediments, 4. Zoological Indicators. KAP, Dordrecht.
- Hou, S., Yuan, L., Jin P., et al. (2013) A clinical study of the effects of lead poisoning on the intelligence and neurobehavioral abilities of children. *Theor. Biol. Med. Mod.* 10 (13).
- INEGI (1990) Estadístico y geográfico de Quintana Roo 1990. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México
- INEGI (2010) *Censo del conteo de población y vivienda*. Recuperado de [http:// www.inegi.org.mx/est/contenidos/Proyectos/ccpv/](http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/Proyectos/ccpv/)
- INEGI (2016) Anuario estadístico y geográfico de Quintana Roo 2016. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México
- INEGI (2020) Censo Población y Vivienda. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- Instituto de Biodiversidad y Áreas Naturales Protegidas del Estado de Quintana Roo (IBANQROO) (1999) Área Natural Protegida Laguna Manatí.
- Jacobs, J.A., Testa, S.M. (2005) Overview of chromium(VI) in the environment: background and history. *Chromium (VI) Handbook*. Boca Raton, CRC Press.
- Jacott, M. (2005) Tóxicos en la industria electrónica. *Campana de Tóxicos*. Mayo 2005, 1-10.
- Jiménez-Cisneros B. (2005) La Contaminación ambiental en México: Causas, Efectos y tecnología apropiada. Limusa, México, 926 p.
- Joksimovic, D., Stankovic, R.A., Stankovic, S. (2011) Metal accumulation in the biological indicator (*Posidonia oceanica*) from the Montenegrin Marine and coastal studies. 25 (1), 37-58.
- Jovic, M., Onjia, A., Stankovic, S. (2012) Toxic metal health risk by mussel consumption. *Environ. Chem. Lett.* 1, 69-77.
- Jovic, M., Stankovic, R.A., Slavkovic- Beskoski L., Tomic, I., Degetto, S., Stankovic, S. (2011) The environmental quality of the coastal water of the Boka Kotorska bay (Montenegro) using mussels as a bioindicator. *J. Serbian Chem. Soc.* 76 (6), 933-946.
- Kabata-Pendias, A. (1995) Agricultural problem related to exercise trace metal contents of soil. In: *Heavy Metals*, Salomons, W., Förstner U, Mader. P. (eds.) Springer- Verlag, Berlin.
- Karlsson, C. (2008) Risk assessment of compounds that could impair the aquatic environment. *EKOTOXIKOLOGI*. Swedish Environmental Protection Agency: Stockholm, Sweden, 56 p.
- Kitowski, L., Kowalski, R., Komosa, A., Lechowski, J., Grzywaczewski, G., Scibior, R., Pilucha, G., Chrapowicki, M. (2012) Diversity of total mercury concentrations in kidneys of birds from Eastern Poland. *Ekologia (Bratislava)*. 31(1), 12-21.
- Koller, M. Saleh, H.M. (2018) Introductory Chapter: Introducing Heavy Metals, Heavy Metals, Hosam El- Din M. Saleh and Refaat F. Aglan, IntechOpen, DOI: 10.5772/intechopen.74783. Available from: <https://www.intechopen.com/books/heavy-metals/introductory-chapter-introducing-heavy-metals>.
- Koste, W. (1978) *Rotatoria En: Die Radertiere Mitteleuropas*, Bortjtraeger, Berlin, 673 p.
- Koste, W., Shiel, R. J. (1990) Rotifera from Australian inland waters V. Lecanidae (Rotifera: Monogononta). *Trans. R. Soc. S. Aust.* 114, pp. 1–36. [https:// doi.org/10.1071/it9870949](https://doi.org/10.1071/it9870949).
- Kotov, A.A., Stifter, P. (2006) Cladocera: Family Ilyocryptidae (Branchiopoda: Cladocera: Anomopoda). In: Dumont, H.J. (Ed.). *Guides to the Identification of the Macroinvertebrates of the Continental Waters of the World*, 22. Kenobi Production, Backhuys Publishers, Leiden 172 p.

- Kotov, A.A., Jeong, H.G., Lee, W. (2012) Cladocera (Crustacea: Branchiopoda) of the south-east of the Korean Peninsula, with twenty new records for Korea. *Zootaxa*. 3368, 50-90.
- Kuczynska-Kippen, N. (2007) Interactions of con-generic *Lecane* species (Rotifera) within different macrophyte patches in a shallow lake. *Pol. J. Ecol.* 55, 91–100.
- Lam, S.K.I., Wang, X.W., (2008) Trace element deficiency in freshwater cladoceran *Daphnia magna*. *Aquat. Biol.* 1 (3), 217-224.
- Lango-Reynoso, F., Landeros-Sánchez, C., Castañeda -Chavez, M. (2010) Bioaccumulation of Cadmium (Cd), Lead (Pb) and Arsenic (As) in *Crassostrea virginica* (Gmelin 1791), From Tamiahua Lagoon System, Veracruz, Mexico. *Rev. Int. de Contam. Am.* 26 (3), 201-210.
- Laprida, C., Massaferro, J., Mercau, M. J. R., Cusminsky, G. (2014) Paleobioindicadores del fin del mundo: Ostrácodos y Quironómidos del extremo sur de Sudamérica en ambientes lacustres cuaternarios. *Lat. Am. J. Sedimentol. Bas. Anal.* 21 (2), 97-117.
- Lawson, D. R., Winchester, J.W. (1979) A Standard Crustal Aerosol as a Reference for Elemental Enrichment Factors, *Atmos. Environ.* 10, 925-930.
- Leal- Bautista, R. M, Lenczewski, M., Acosta- González, G., Grimaldo- Hernández, C. (2020) Evaluation of water quality through the distribution system in Cancun, Mexico. *Soc. y Amb.* 7, 53-45. doi:10.318140/sya. v0i21.2039.
- Liano-Guanes, Rafaela María et al. (2015) Concentración de metales en agua y sedimentos de la cuenca alta del río Grijalva, frontera México-Guatemala. *Tecnol. y Ciencias del Agua*, 6 (4), 61-74.
- Lima, A., F. Lansac-Toha, L. Machado, L. Bini, A. Takeda. (2003) Composition and abundance of cladocera (Crustacean) assemblages associated with *Eichornia azurea* (Swartz) Kunth stands in the upper Parana River floodplain. *Acta Sci.* 25 (1), 41-48.
- Llaguna-Guilberto, O. J., Rodríguez- Varela, J.M., Alcocer-Yamanaka, V.H., Bourguett-Ortiz, V.J. (2016) Modelización del flujo superficial para el trazo de una red de drenaje pluvial en la ciudad de Cancún, Quintana Roo, México. *Acta Univ.* 26 (3), 98-106.
- Lowe, C. D., Kemp, S. J., Díaz-Ávalos, C. Montagnes, D. S. J. (2007) How does salinity tolerance influence the distributions of *Brachionus plicatilis* sibling species? *Mar. Biol.* 150, 377-386. <https://doi.org/10.1007/s00227-006-0366-5>
- Macías-Richard, C., Pérez Aguilar, R. A. (2009) Cancún. Los avatares de una marca turística global.) Universidad de Quintana Roo – CONACYT. México. 479 p.
- Madureira, M-J., Vale, C., Fonseca, N. (2013) Distribución de metales traza en sedimentos de zonas de lodo de la plataforma costera norte de Portugal. *Cienc. Mar.* 29 (4), 435-445.
- Marín, L. E., Steinich, B., Pacheco, J., Escolero, O. A. (2000) Hydrogeology of a contaminated sole-source karst aquifer, Mérida, Yucatán, México. *Geofís. Int.* 39 (4), 359-365.
- Markovic, J., Joksimovic, D., Stankovic, S. (2012) Trace elements concentrations determined in collected wild mussels in the coastal area of southeastern Adriatic, Montenegro. *Arch. of Biol. Sci. Belgrade*, 64, (1), 265-275.
- Mazumdar, M., Bellinger, D.C., Gregas, M., Abanilla, K., Bacic J. (2011) Needleman HL. Low-level environmental lead exposure in childhood and adult intellectual function: a follow-up study. *J. Environ. Health.* 10 (1), 1-7.
- Mazurek, R., J., Kowalska, M., Gasiorek, P., Zadrozny, A., Jozefowska, T., Zaleski, W., Kepka, M., Tymczuk, K., Orłowska. (2017). Assessment of heavy metals contamination in surface layers of Roztocze National Park forest soils (South-East Poland) by indices of pollution, *Chemosphere*. 168, 839-850.
- Medina-González R, Zetina-Moguel C, Comas-Bolio M, Pat-Canul R. (2004) Concentración de Cd, Cr, Cu y Pb en sedimentos y en tres especies de pepino de mar (clase holothuroidea) de las costas del Estado de Yucatán, México. *Ingeniería.* 8, 7-19.
- Mejía- Saavedra, J., Sánchez- Armas, S., Santos-Medrano, G.E., González- Amaro, R., Razo-Soto, I., Rico-Martínez, R., Díaz- Barriga, F. (2005). Effect of co-exposure to DDT and

- manganese on freshwater invertebrates: Pore water from contaminated rivers and laboratory studies. *Environ. Toxicol. Chem.* 24 (8), 2037-2044.
- Miracle, M.R. (2015) Clase Maxillopoda: Subclase: copépoda: Orden Cyclopoida. *Ibero Diversidad Entomología (IDE)*. 95, 1-19.
- Mireles, A., Sol, C., Andrade, E., Lagunas-Solar, M., Pina, C., Flocchini, R.G. (2004) Heavy metal accumulation in plants and soil irrigated with wastewater from Mexico City. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B*.
- Mora, A., Jumbo- Flores, D., González- Merizalde, M., Bermeo- Flores, S.A. (2006) Levels of heavy metals in riverine sediments of the Puyango river basin, Ecuador. *Rev. Int. Contam. Amb.* 32 (4), 385-397.
- Mora-Donjuán, C.A., Burbano- Vargas, O.N., Méndez- Osorio, C., Castro- Rojas, D.F. (2017) Evaluación de la biodiversidad y caracterización estructural de un bosque de Encino (*Quercus L.*) en la Sierra Madre del Sur, México. 14 (35), 385-397.
- Navarro-Aviñó, J.P., Aguilar Alonso, I., López-Moya, J.R. (2007) Aspectos bioquímicos y genéticos de la tolerancia y acumulación de metales pesados en plantas. *Ecosistemas*. 16 (2), 10-25.
- Nava-Ruiz, C., Méndez-Armenta, M. (2011) Efectos neurotóxicos de metales pesados (cadmio, plomo, arsénico y talio). *Arch. Neurocienc.* 16 (3) 140-147.
- Nordberg, G., Fowler, B.A., Nordberg, M., Friberg, L.T. (2007) *Handbook on the Toxicology of Metals*. 3er. Ed. Academic Press.
- Norma Oficial Mexicana. NOM- 029- SEMARNAT- 1993, Bienes y servicios. Productos de la pesca. Crustáceos fresco- refrigerados y congelados. Especificaciones sanitarias.
- Norma Oficial Mexicana. NOM-001-SEMARNAT-1996, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.
- Norma Oficial Mexicana. NOM-001-147-SEMARNAT/SSA 1-2004, Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénicos, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio.
- Norseth, T. (1981) The carcinogenicity of chromium. *Environ. Health Perspect.* 40, 121-130.
- O'Brien, T.J., Ceryak, S., Patierno, S.R. (2003) Complexities of chromium carcinogenesis: role of cellular response, repair and recovery mechanisms. *Mutat. Res.* 533, 3-36.
- Orozco-Jiménez, D.T., Sosa-Ramírez, J., Jiménez-Sierra, C., Cortes- Calva. (2015) La importancia de las Áreas Naturales Protegidas en nuestro país. *Red Áreas Naturales Protegidas. Red Temática CONACYT*.
- Padilla, N.S. (2015) The environmental effects of Tourism in Cancun, Mexico. *Int. J. Environ. Sci.* 6 (1), 1-13.
- Peña, C. E., Carter, D.E., Ayala-Fierro, F. (2001) *Toxicología Ambiental: Evaluación de Riesgos y Restauración Ambiental*. Distributed on the Internet via the Southwest Hazardous Waste Program website at <http://superfund.pharmacy.arizona.edu/toxamb/>.
- Pérez-Legaspi, I. A., García-Villar, A. M., Garatachía-Vargas, M., Hernández-Vergara, M.P., Pérez-Rostro, C.I., Ortega-Clemente, L.A. (2015) Influence of temperature and food type on the life history of *Ceriodaphnia cornuta* Sars 1885, (Crustacea: Cladocera), *Investigación y Ciencia*. 23 (64), 11-18.
- Perry, E., Velazquez, G., Marin, L. (2002) The Hydrochemistry of the Karst Aquifer System of the Northern Yucatan Peninsula, Mexico. *Int. Geol. Rev.* 44 (3), 191-221.
- Pieczynska, P. (1990) Littoral habitats and communities. 39-72. En: Jorgensen, S. E. y H. Löffler. (Eds.). *Guidelines of lake management. Lake shore management. International Lake Environment Committee. United Nations Environment Programme, Shiga, Japón*. 174 p.

- Pirrone, N., Cinnirella, S., Feng, X., Finkelman, R.B., Friedli, H.R., Leaner, J., Mason, R., Mukherjee, A.B., Stracher, G.B., Streets, D.G., Tielman, K. (2010) Global mercury emissions to the atmosphere from anthropogenic and natural sources. *Atmos. Chem. Phys.* 10, 5951-5964.
- PMPMS- Programa de Medidas Preventivas y de Mitigación de la Sequía (2014). Ciudad de Cancún. En Programa Nacional Contra la Sequía (PRONACOSE), Estrada Medina H., Castilla M. (eds.) Universidad Autónoma de Yucatán, México, 171 p.
- PNUMA (2002) Perspectivas del Medio Ambiente Mundial Geo- 3. Programa de la Naciones Unidas para el Medio Ambiente primera edición, 441 p.
- Polanco- Rodríguez, A.G. (2017) Contaminación del agua y bioacumulación en el ser humano de plaguicidas organoclorados en el estado de Yucatán, México. *Rev. Univers. Mar. Méx.*, 1 (1), 1-8.
- Prudêncio, M.I., Gonzales, M.I., Dias, M.I., Galan, E., y Ruiz, F. (2007) Geochemistry of sediments from El Melah lagoon (North- East Tunisia): a contribution for the evaluation of anthropogenic inputs: *J. Arid Environ.* 69, 285-298.
- Rai, N., Pal, A. (2002) Health hazards of heavy metals. *EnviroNews ISEB India* vol.8 No. 1. In: International conference on plants and environmental pollution (ICPEP-2). Proceedings of the 2nd international conference on plants and environmental pollution, Lucknow, India, 4–9 Feb 2002. <http://isebindia.com/issuewise.html>
- Rainbow, P. S., Luoma, S. N. (2011) Metal toxicity, uptake and bioaccumulation in aquatic Invertebrates-Modelling zinc in crustaceans. *Aquat. Toxicol.* 105 (3), 455-465.
- Reyes, Y.C., Vergara, I., Torres, O.E., Díaz-Lagos, M., González, E.E. (2016) Contaminación por metales pesados: implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Rev. Ing. Invest. y Desar.* 16 (2), 66-77.
- Roca, J.R., Baltanas, A., Uiblein, F., (1993) Adaptive responses in *Cypridopsis vidua* (Crustacea: Ostracoda) to food and shelter offered by a macrophyte (*Chara fragilis*).
- Rodríguez, J. 2001. Ecología. Ediciones Pirámide. Madrid. 411 p.
- Rodríguez, J., Villaseñor, R., Martínez, F. (2003) Efecto de la temperatura y tipo de alimento en el cultivo de *Moina micrura* (Kurz,1874) (Anomopoda: Moinidae) en condiciones de laboratorio. *Hidrobiol.* 13 (3), 239-246.
- Roman, G., Isnard, P., Jouany, J.M. (1999) Critical analysis of methods for assessments of predicted No- effect concentration. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 43.
- Romero, E.C. (2001) El Boro, elemento nutricional, esencial en la funcionalidad ósea. *Esp. Cirug. Ost. Art.* 36 (206), 88-95.
- Romero, J. (2020) Metaloides. Available from: [https:// es.scribd.com- document-Metaloides-docx](https://es.scribd.com-document-Metaloides-docx).
- Rossa, D., F. Lansac-Toha, C. Bonecher y F. M. Velho. (2001) Abundance of cladocerans in the littoral regions of two environments of the upper Parana River flood plain, Mato Grosso de Sul, Brazil. *Rev. Bras. Biol.* 61 (1), 45-53.
- Rubio-Franchini, I., López- Hernández, M., Ramos-Espinosa, M.G., Rico-Martínez, R. (2016) Bioaccumulation of Metals Arsenic, Cadmium, and Lead in Zooplankton and Fishes from the Tula River Watershed, Mexico. *Wat. Air and Soil Poll.* 227 (1), 1-12.
- Ruiz, E., Echenandía, A., Romero, F. (1994) Relaciones entre agua y sedimento en Rio Torrencial. *Limnética*, 10 (1), 101-107.
- Ruiz-Sandoval, D. (1997) Perfil del desarrollo turístico en áreas naturales protegidas. *Gaceta Ecológica—Instituto Nacional de Ecología (INE)*. 101-107.
- Sadiq, M. (1992) Toxic metal chemistry in marine environments. Marcel Dekker, Inc., New York, 390 p.
- Sánchez, A., Bautista, F., Goguitchaichvili, A., Cejudo, R., Reyes, J.A., Solís Domínguez, F.A., Morales, J.J. (2015) Evaluación de la contaminación ambiental a partir del aumento

- magnético en polvos urbanos-Caso de estudio para la ciudad de Mexicali, México. Rev. Mex. Cienc. Geol. 32 (3), 501-513.
- Santos, M.; Melão, M., Lombardi, A. (2006) Life history characteristics and production of *Ceriodaphnia silvestrii* Daday (Crustacea, Cladocera) under different experimental conditions. Acta Limnol. Bras. 18 (2), 199-212.
- Sarma, S.S.S., Nandini, S. (2006) Review of Recent Ecotoxicological Studies on Cladocerans. J. Environ. Sci. and Health, Part B. Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes, 41, 1417-1430.
- Sauquillo, A., Rigol, A., Rauret, G. (2003) Overview of the use of Leaching Extraction Tests for Risk Assessment of Trace Metals in Contaminated Soils and Sediments. Trends Anal. Chem. 22, 152-159.
- Scheringer, M., Hungerbühler, K., Matthies, M. (2001) The Spatial Scale of Organic Chemistry in Multimedia Fate Modelling: Recent Developments and Significance for Chemical Assessment. Environ. Sci. Pollut. Res. 8 (3), 150-155.
- SEMARNAT - Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (1996b) Norma Oficial Mexicana NOM-001-Semarnat-1996 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. México, DF: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
- SEMARNAT - Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, (2012) Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de estadísticas ambientales indicadores clave y de desempeño ambiental. Pp. 1- 382.
- SEMARNAT - Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2015) Atlas del Agua en México
- SEDATU - Secretaria de Desarrollo Agrario Territorial y Urbano (2013) Programa de Desarrollo Urbano del Centro de Población Cancún, Municipio Benito Juárez, Quintana Roo (2014-2030) 281 p.
- SEDESOL – Secretaria de Desarrollo Social (2012) Programa Municipal de Desarrollo Urbano Sustentable de Benito Juárez. Noviembre 2012, 217 p.
- Segers, H. (1995) Rotifera. Vol. 2: The Lecanidae (Monogononta). In H.J.F. Dumont (Ed.), Guides to the identification of the microinvertebrates of the continental waters of the World, Vol. 6. The Hague, Netherlands: SPB Academic Publishing.
- Segers, H., Savatnalinton, S. (2010) A critical re-evaluation of the Lecanidae (Rotifera: Monogononta) of Thailand, with description of a new species. Int. Rev. of Hydrobiol. 95, 343-351. <https://doi.org/10.1002/iroh.201011276>.
- Sevcikova, M., Modra, H., Slaninova, A., Svobodova, Z. (2011) Metals as a cause of oxidative stress in fish: a review. Vet. Med. and Sci. 56 (11), 537-546.
- Shuhaimi- Othman., Yakub, N., Nur-Amalina, R., Abas, A. (2001) Toxicity of Metals to a Fresh Water Ostracod: *Stenocypris major*, J. of Toxicol. 136104.
- Stankovic, S., Kalaba, P., Stankovic, A.R. (2013) Biota as toxic metal indicators. Environ. Chem. Lett. 12(1), 63-84.
- Stankovic, S., Stankovic, A.R. (2013) Bioindicators of Toxic Metals. In: Green Materials for Energy, Products and Depollution, Lichtfouse, E., Schwarzbauer, J., Robert, D. (eds). Vol 3. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6836-9_5
- Sternbeck, J., Sjödin, A., Andreasson, K. (2002) Metal Emissions from Road Traffic and the Influence of Resuspension. Atmos. Environ. 36, 4735-4744.
- Steubing, B. (2007) Generación de residuos electrónicos en Chile. Tesis de Master, EPFL, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Plataforma RELAC y Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research (EMPA).
- Szyczewski, P., Siepak, J., Niedzielski, P., Sobczynski, T. (2009) Research on heavy metals in Poland. Pol. J. of Environ. Studies. 5, 755-768.

- Tchounwou, P.B., Yedjou, C.G., Patlolla, K.A., Sutton, D.J. (2014) Heavy Metals Toxicity in the Environment. NIH- RCMI Center for Environmental Health. Jackson State University.
- Tobías- Lagos, A.M., Daza, A., González, A.J., Londoño, R. (2014) Zooplankton. *InfoZOA - Boletín de Zoología*, 3, 24 p.
- Torres-Guzmán F. (2009) Estudio de la toxicidad en muestras de agua y sedimentos de la Cuenca del Río San Pedro en el estado de Aguascalientes, empleando pruebas de toxicidad: integración de estudios de campo y laboratorio. Tesis de Doctorado. Universidad Autónoma de Aguascalientes. Aguascalientes, México. 167 p.
- Tun-Canto, G.E., Álvarez- Legorreta, T., Zapata-Buenfil, G., Sosa-Cordero, E. (2017) Metales pesados en suelos y sedimentos de la zona cañera del sur de Quintana Roo. *Rev. Mex. Cienc. Geol.* 34 (3), 157-169.
- Turekian, K., K., Wedepohl. (1961) Distribution of the Elements in Some Major Units of the Earth's Crust. *Geol. Soc. of Am. Bull.* 72, 175-192.
- UNEP. (2013) The UNEP Global Mercury Assessment Sources, Emissions and Transport, EDP Sciences.
- USEPA – United States Environmental Protection Agency (1992) Environmental Criteria and Assessment Office, Integrated Risk Information System (IRIS).
- USEPA – United States Environmental Protection Agency (2014) USEPA Integrated Risk Information System (IRIS) online database. Available at: <http://www.epa.gov/iris> (Accessed: Nov. 2015).
- Verkleji, J.A.S. (1993) The effects of heavy metals stress on higher plants and their use as biomonitors in Plant as Bioindicators: Indicators of Heavy Metals in the Terrestrial Environment. Markert Editors. New York.
- Villanueva, S., Botello, A. (1992) Metales pesados en la zona costera del golfo de México y Caribe Mexicano: Una Revisión. *Rev. Int. Contam. Amb.* 8 (1).
- Villanueva, F.S., Botello, A.V. (1998) Metal Pollution in Coastal Areas of Mexico. In: Reviews of Environmental Contamination and Toxicology Ware, G.W. (ed). 157. Springer, New York, https://doi.org/10.1007/978-1-4612-0625-5_3
- Walker, C., Sibly, R., Hopkin, S., Peakall, D. (2012) Principles of ecotoxicology. Fourth edition. New York: Taylor & Francis Group LLC.
- Walker, K.F., (1981) A synopsis of ecological information on the saline lake rotifer *Brachionus plicatilis* Muller 1786. *Environ. Sci.* 181, 159-167. <https://doi.org/10.1007/BF00048713>.
- Wallace, R. L., Snell, T.W. C. Ricci, C., Nogrady, T. (2006) Rotifera vol. 1: Biology, ecology and systematics (2nd edition). En Segers H., y H. J. Dumont (eds) Guides to the Identification of the Microinvertebrates of the Continental Waters of the World, 23. Kenobi Productions, Gent, Belgium and Backhuys Academic Publishing BV. The Hague, The Netherlands.
- Wang, G., Yinglan, A., Jiang, H., Fu, Q., Zheng, B. (2015) Modeling the source contribution of heavy metals in surficial sediment and analysis of their historical changes in the vertical sediments of a drinking water reservoir. *J. of Hydrol.* 520, 37-51.
- Wang, X., Lui, B., Zhang, W. (2020) Distribution and risk analysis of heavy metals in sediments from the Yangtze River Estuary, China. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 27. 10802-10810.
- Wang, X.F., Xing, M.L., Shen, Y., Zhu, X., Xu, L.H. (2006) Oral administration of Cr (VI) induced oxidative stress, DNA damage and apoptotic cell death in mice. *Toxicology.* 228, 16-23.
- Wegman D. H. Eisen E.A., Hu Xiaohan, Woskic S. R., Smith R. G. Garabiant D.H. (1994) Acute and chronic respiratory effects of sodium borate particulate exposures. *Environ. Health Pros.* 102, 119-128.
- WHO - World Health Organization (2011) Guidelines for Drinking-water Quality. 4a Ed. World Health Organization, Geneva.
- Whorton D., Haas, J., Trent, L. (1994) Reproductive effects of inorganic borates on male employees: birth rate assessment. *Environ. Health Pros.* 102, 129-131.

- Wong, C.S.C., Li, X., Thornton, I. (2006) Urban environmental geochemistry of trace metals: a review. *Environ. Pollut.* 142, 1-16.
- Wu, B., Song J.M., Li X.G. (2013) Environmental characteristics of heavy metals in surface sediments from the Huanghe estuary. *Environ. Sci.* 34 (4), 1324-1332.
- Wyatt, C.J., Fimbres, C., Romo, L., Mendez, R.O., Grijalva, M. (1998) Incidence of heavy metal contamination in water supplies in Northern Mexico. *Environ. Res.* 76, 114-119.
- Xiang, X. L., Xi, Y. L., Zhu, L. Y., Xu, Q. L. (2017) Comparative studies of the population genetic structure of the *Brachionus calyciflorus* species complex from four inland lakes in Wuhu, China. *Biochem. System. Ecol.* 71, 69-77. <https://doi.org/10.1016/j.bse.2017.01.015>
- Xiao, Q., Zong, Y.T., Lu, S.G. (2015) Assessment of heavy metal pollution and human health risk in urban soils of steel industrial city (Anshan), Liaoning, Northeast China. *Ecotox. Environ. Saf.* 120, 377-385.
- Yong R. N., Thomas H.R. (1997) *Geoenvironmental Engineering. Contaminated ground: fate of pollutants and remediation*, Telford Services Ltd.
- Zafra- Mejía, C. A., Temprano- González, J., Tejero- Monzón, J. I. (2007) Contaminación por escorrentía superficial urbana: metales pesados acumulados sobre la superficie de una vía. *Rev. Ing. e Invest.* 27 (1), 4-10.
- Zapata-Carbonell, J. G., Bautista, F., Rendón-von, O. J., Lagunes-Espinoza, L. C., Palma-López, D. J., Cejudo-Ruiz, F. R., Goguichaichvili, A., Frausto-Martínez, A. (2017) Geochemical characterization and spatial distribution of heavy metals from urban dust in Chetumal, México. *Ing. Invest. y Technol.* 20 (3), 1-9.

ANEXOS

Tabla A1. Muestras de cuantificación de metales en sedimento

Código	Peso de muestra (g)	Concentración en mg/Kg										
		Al	Ba	B	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
LMP1S	0.5053	6676	8.15	<LDM	<LDM	3.25	11.6	721.2	12.15	0.60	<LDM	326
LMP1SA	0.5007	6618	8.32	<LDM	<LDM	3.42	12.3	737.4	12.18	0.67	<LDM	328
LMP2S	0.5058	6455	9.75	<LDM	<LDM	3.58	47.9	1346.0	12.65	8.05	1.40	2500
LMP2SA	0.5017	6920	10.12	<LDM	0.15	7.97	52.1	1427.0	13.48	3.09	1.14	2823
LMP3S	0.5002	9695	9.54	<LDM	0.10	8.49	25.1	1159.0	12.96	3.75	<LDM	1055
LMP3SA	0.5014	9157	9.21	<LDM	0.06	6.29	25.7	1128.0	12.14	2.13	<LDM	965
LMP4S	0.5014	247.4	5.19	52.8	<LDM	7.20	4.84	50.6	<LMD	1.42	<LDM	218
LMP4SA	0.5010	260.3	5.11	22.2	<LDM	<LDM	4.16	58.1	<LMD	1.84	<LDM	601
LMP5S	0.5014	159.6	6.30	7.36	<LDM	<LDM	3.10	34.3	<LMD	0.28	<LDM	161
LMP5SA	0.5028	152.8	5.98	1.25	<LDM	<LDM	2.91	31.8	<LMD	0.19	<LDM	257
LMP6S	0.5035	110.0	5.68	<LDM	<LDM	<LDM	2.57	27.0	<LMD	0.18	<LDM	68.82
LMP6SA	0.5000	115.7	5.56	<LDM	<LDM	<LDM	2.54	28.9	<LMD	<LDM	<LDM	109
LMP7S	0.5002	88.1	5.68	<LDM	<LDM	<LDM	3.22	11.6	<LMD	<LDM	<LDM	116
LMP7SA	0.5007	94.8	5.58	<LDM	<LDM	<LDM	2.63	12.8	<LMD	<LDM	<LDM	54.16
LMP8S	0.5004	126.7	5.47	<LDM	<LDM	<LDM	2.83	22.3	<LMD	<LDM	<LDM	84.27
LMP8SA	0.5001	150.2	5.47	<LDM	<LDM	<LDM	2.64	21.2	<LMD	<LDM	<LDM	33.84
LMP9S	0.5000	136.0	5.82	<LDM	<LDM	<LDM	6.02	19.9	<LMD	0.22	<LDM	79.58
LMP9SA	0.5000	136.0	5.75	<LDM	<LDM	<LDM	3.86	17.0	<LMD	<LDM	<LDM	30.84
LMP10S	0.5000	223.5	5.29	<LDM	<LDM	<LDM	4.70	50.8	<LMD	0.24	<LDM	71.94
LMP10SA	0.5011	225.2	5.14	<LDM	<LDM	<LDM	3.54	46.3	<LMD	0.19	<LDM	67.74
LMP11S	0.5008	160.7	4.89	<LDM	<LDM	<LDM	2.53	24.7	<LMD	<LDM	<LDM	32.88
LMP11SA	0.5001	172.6	4.85	<LDM	<LDM	<LDM	2.64	26.9		0.13	<LDM	50.26
LMP12S	0.5000	153.6	1.16	<LDM	<LDM	<LDM	2.75	61.4	<LMD	0.57	<LDM	189
LMP12SA	0.5003	210.0	1.30	<LDM	<LDM	<LDM	3.56	97.3	<LMD	1.69	<LDM	368

(<LDM = inferior al límite de detección del método)

Tabla A2. Muestras de cuantificación de metales en la biota acuática de la Laguna Manatí.

Lugar	Código	Especies	# Organismos	Fecha	Metales (mg/L)
	LM-P1-Rot-(1)	<i>Lecane bulla</i>	100	6-junio-2021	ND
	LM-P1-Rot-(2)	<i>Lecane bulla</i>	100	6-junio-2021	ND
	LM-P1-Cop-(1)	<i>Eucyclops serrulatus</i>	10	6-junio-2021	ND
	LM-P1-Cop-(2)	<i>Eucyclops serrulatus</i>	10	6-junio-2021	ND
	LM-P1-Ostrac-(1)	<i>Cypridopsis vidua</i>	10	6-junio-2021	ND
	LM-P1-Ostrac-(2)	<i>Cypridopsis vidua</i>	10	6-junio-2021	ND
	LM-P1-Test-(1)	<i>Testudinella patina</i>	10	6-junio-2021	ND
	LM-P1-Test-(2)	<i>Testudinella patina</i>	10	6-junio-2021	ND
Canal de drenaje	LM-P2-Rot-(1)	<i>Lecane bulla</i>	100	6-junio-2021	ND
	LM-P2-Rot-(2)	<i>Lecane bulla</i>	100	6-junio-2021	ND
	LM-P2-Cop-(1)	<i>Eucyclops serrulatus</i>	20	6-junio-2021	ND
	LM-P2-Cop-(2)	<i>Eucyclops serrulatus</i>	10	6-junio-2021	ND
	LM-P2-Eugl (1)	<i>Euglena viridis</i>	200	6-junio-2021	ND
	LM-P2-Eugl (2)	<i>Euglena viridis</i>	300	6-junio-2021	ND
	LM-P2-Ostrac (1)	<i>Cypridopsis vidua</i>	10	6-junio-2021	ND
	LM-P2-Ostrac (2)	<i>Cypridopsis vidua</i>	10	6-junio-2021	ND
	LM-P2-Test-(1)	<i>Testudinella patina</i>	10	6-junio-2021	ND
	LM-P2-Test-(2)	<i>Testudinella patina</i>	10	6-junio-2021	ND
Zona este	LM-P3-Rot-(1)	<i>Lecane bulla</i>	40	6-junio-2021	ND
	LM-P3-Cop-(1)	<i>Eucyclops serrulatus</i>	10	6-junio-2021	ND
	LM-P3-Cop-(1)	<i>Eucyclops serrulatus</i>	10	6-junio-2021	ND
Zona oeste	LM-P4-Cop (1)	<i>Eucyclops serrulatus</i>	10	6-junio-2021	ND
	LM-P4-Cop-(2)	<i>Eucyclops serrulatus</i>	10	6-junio-2021	ND
Zona norte	LM-P5-Clad (1)	<i>Ceriodaphnia cornuta</i>	20	6-junio-2021	ND
Canal de drenaje	Zona #1 Control	<i>Lecane bulla</i>	100	6-junio-2021	ND
	Zona #2 Control	<i>Lecane bulla</i>	100	6-junio-2021	ND

(ND= no detectado)

Tabla A3. Muestras de cuantificación de metales en agua de la Laguna Manatí.

Código	Concentración (mg/L)										
	Al	Ba	B	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
LMP1	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM
LMP2	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM
LMP3	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM
LMP4	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM
LMP5	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM
LMP6	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM
LMP7	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LMD	<LMD	<LDM	<LDM
LMP8	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LMD	<LMD	<LDM	<LDM
LMP9	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LMD	<LMD	<LDM	<LDM
LMP10	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LMD	<LMD	<LDM	<LDM
LMP11	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LMD	<LMD	<LDM	<LDM
LMP12	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LMD	<LMD	<LDM	<LDM
(Blanco)	45.360	0.048	<LDM	<LDM	<LDM	0.022	0.355	-	0.029	0.123	<LDM
(Blanco)	0.159	0.007	<LDM	<LDM	<LDM	0.015	<LDM	-	0.002	<LDM	<LDM
(Blanco)	43.220	0.048	<LDM	<LDM	<LDM	0.017	0.25	-	0.026	0.124	<LDM
(Blanco)	0.058	0.004	<LDM	<LDM	<LDM	0.016	<LDM	-	<LDM	<LDM	<LDM
(Blanco)	0.112	0.018	<LDM	<LDM	<LDM	0.077	<LDM	-	0.004	<LDM	<LDM
(Blanco)	0.088	0.001	<LDM	<LDM	<LDM	0.014	<LDM	-	0.004	<LDM	<LDM
(LD Teórico)	0.028	0.004	0.0057	0.007	0.0071	0.028	0.0046	-	0.015	0.042	0.0059
(LD Experimental)	0.0026	0.0016	0.0011	0.0049	0.0006	0.0007	0.003	-	0.0007	0.0056	0.0007

(<LDM = inferior al límite de detección del método, Limite de detección teórico (LD Teórico) = Reportado en el software Syngistix for ICP de Perkin Elmer, Limite de detección experimental (LD Experimental) = Calculado a partir del promedio de los blancos analíticos y desviación estándar en las mediciones)

Tabla A4. Tabla de Control de calidad de resultados

Elementos	Rango de trabajo	Pendiente	Ordenada al origen	r ² (a)	Límite de detección		Blanco *	D.E. ^b	D.E.R (%) ^c
					Teórico (mg/ L)	Experimental (mg/L)			
Aluminio	0.5- 20 mg/ L	19781.2	442700	0.9999	0.028	0.0026	0.088- 45.36	0.01- 0.591	0.09- 2.93
Bario	0.5- 20 mg/ L	76134.7	687400	0.9998	0.004	0.0016	0.004- 0.048	0.0001-0.003	1.00-7.50
Boro	1.25- 50 mg/ L	140484.3	234900	0.9996	0.0057	0.0011	-	-	-
Cobalto	0.125- 5 mg/ L	4825.8	221600	0.9999	0.007	0.0049	-	-	-
Cobre	0.25- 10 mg/ L	3218.8	604700	0.9999	0.028	0.0007	0.014- 0.077	0.001	0.04- 2.50
Cromo	0.25- 10 mg/ L	6050.4	488800	0.9999	0.0071	0.0006	-	-	-
Hierro	1.25- 50 mg/ L	80912.2	444400	0.9999	0.0046	0.003	0.25- 0.0355	0.0012	0.33
Manganeso	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Níquel	0.25- 10 mg/ L	9339.9	41900	0.9998	0.015	0.0007	0.002- 0.0029	0.0	0.1- 17.46
Plomo	0.5- 20 mg/ L	3306.7	21400	0.9997	0.042	0.0056	0.123- 0.124	0.001	-
Zinc	1.25- 50 mg/ L	782.1	3794	0.9997	0.0059	0.0007	-	-	-

^a Coeficiente de correlación lineal, ^bDesviación Estándar, ^cDesviación estándar relativa (%). * Los valores de blanco analítico representan tres lotes de muestras; el valor del blanco correspondiente fue restado los valores obtenidos en cada lote.

Figura A1. Modelo conceptual de la contaminación ambiental por metales en los organismos bentónicos de Laguna Manatí y su evaluación ambiental integral. MEC= Concentración; PNEC= Concentración Predictiva sin Efecto

