



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**EVALUACIÓN DE LA ACUMULACIÓN  
DE Cr, Ni Y Pb EN SEDIMENTOS  
FECHADOS CON  $^{210}\text{Pb}$  (SUR DEL  
GOLFO DE MÉXICO).**

**TESIS**

Que para obtener el título de  
**Ingeniero Geólogo**

**P R E S E N T A**

Aarón Samuel Crisanto Ruiz

**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. Jorge Feliciano Ontiveros Cuadras



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2023**

# Índice general

Agradecimientos	1
Resumen	2
Abstract	3
1. Introducción	4
1.1 Justificación	6
1.2 Objetivo general	7
1.3 Objetivos específicos	7
2. Marco teórico	8
2.1 Humedales	8
2.2 Lagunas costeras	8
2.3 Clasificación de las lagunas costeras	9
2.4 Procesos sedimentarios	9
2.5 Fuentes de sedimentos.	10
2.6 Caracterización de sedimentos	11
2.6.1 Granulometría	11
2.6.2 Materia orgánica y carbonatos	11
2.6.3 Fechado de sedimentos con $^{210}\text{Pb}$	12
2.7 Elementos potencialmente tóxicos	13
2.8 Procesos de adsorción de metales traza en sedimentos	14
2.9 Cromo	15
2.10 Níquel	16
2.11 Plomo	16
2.12 Normalización	17
2.13 Factor de enriquecimiento	17
3. Antecedentes	19
3.1 Local	19
3.2 Nacional	21
3.3 Internacional	22
4. Área de estudio	23
4.1 Localización	23
4.2 Características generales	24
4.3 Población	25

4.4	Accesos y vías de comunicación	26
4.5	Orografía	27
4.6	Hidrología	28
4.7	Flora y fauna	31
4.8	Clima	32
4.9	Geología regional	34
4.10	Geología local	35
4.11	Amenazas	37
5.	Metodología	39
5.1	Trabajo de campo	39
5.1.1	Muestreo	39
5.2	Trabajo de laboratorio	40
5.2.1	Análisis granulométricos	40
5.2.2	Fechaado con $^{210}\text{Pb}$	40
5.2.3	Análisis químico	41
5.2.3.1	Contenido de materia orgánica y carbonatos	41
5.2.3.2	Análisis de elementos mayores	43
5.2.3.3	Análisis de metales traza	45
5.2.3.3.1	Análisis de Níquel (Ni)	47
5.2.3.3.2	Análisis de Cromo (Cr)	48
5.2.3.3.3	Análisis de Plomo (Pb)	49
5.3	Legislación aplicable	50
6.	Resultados	51
6.1	Materia orgánica	51
6.2	Carbonatos	52
6.3	Tamaño de partícula	53
6.4	Elementos mayores	55
6.5	Metales traza	58
6.5.1	Plomo (Pb)	58
6.5.2	Níquel (Ni)	59
6.5.3	Cromo (Cr)	60
6.6	Radiocronología con $^{210}\text{Pb}$	61
6.6.1	Actividad de $^{210}\text{Pb}$ total	61

6.6.2	Actividad de $^{210}\text{Pb}$ de base y $^{210}\text{Pb}$ en exceso	61
6.6.3	Radiocronología con $^{210}\text{Pb}$	62
6.7	Tasas de acumulación másica y sedimentaria	62
7.	Discusión	65
7.1	Radiocronología con $^{210}\text{Pb}$	65
7.2	Factor de enriquecimiento	65
7.3	Comparación del contenido de Cr, Ni y Pb en los núcleos LT con otros sitios costeros	67
7.4	Flujos históricos de Cr, Ni y Pb	69
8.	Conclusiones	73
9.	Referencias	75
10.	Anexos	88
	Anexo 1 Tabla de concentración de Carbono orgánico e inorgánico núcleo LT01.	88
	Anexo 2 Tabla de concentración de Carbono orgánico e inorgánico núcleo LT02.	89
	Anexo 3 Tabla de concentración de Carbono orgánico e inorgánico núcleo LT03.	90
	Anexo 4 Distribución del tamaño de grano (%) para arcillas (< 3.9 $\mu\text{m}$ ), limos (3.9-63 $\mu\text{m}$ ) y arenas (> 63 $\mu\text{m}$ ) en el núcleo de sedimento LT01.	91
	Anexo 5 Distribución del tamaño de grano (%) para arcillas (< 3.9 $\mu\text{m}$ ), limos (3.9-63 $\mu\text{m}$ ) y arenas (> 63 $\mu\text{m}$ ) en el núcleo de sedimento LT02.	92
	Anexo 6 Distribución del tamaño de grano (%) para arcillas (< 3.9 $\mu\text{m}$ ), limos (3.9-63 $\mu\text{m}$ ) y arenas (> 63 $\mu\text{m}$ ) en el núcleo de sedimento LT03.	93
	Anexo 7 Concentración (%) de elementos mayores en el núcleo de sedimento LT01.	94
	Anexo 8 Concentración (%) de elementos mayores en el núcleo de sedimento LT02.	96
	Anexo 9 Concentración (%) de elementos mayores en el núcleo de sedimento LT03.	97
	Anexo 12 Concentración ( $\mu\text{g g}^{-1}$ ) de níquel (Ni), cromo (Cr) y plomo (Pb) en el núcleo de sedimento LT03.	100
	Anexo 14 Actividad de $^{210}\text{Pb}_{\text{tot}}$ , TAM y TAS del núcleo de sedimento LT02.	102
	Anexo 15 Actividad de $^{210}\text{Pb}_{\text{tot}}$ , TAM y TAS del núcleo de sedimento LT03.	103
	Anexo 16 Actividades ( $\text{Bq kg}^{-1}$ ) de $^{210}\text{Pb}_{\text{tot}}$ y $^{210}\text{Pb}_{\text{base}}$ de los núcleos de sedimento LT01, LT02 y LT03.	104
	Anexo 17 ANOVAS de los núcleos de sedimento LT01, LT02 y LT03: A) Materia Orgánica B) Carbonato.	104
	Anexo 18 ANOVAS de los núcleos de sedimento LT01, LT02 y LT03: A) Arenas B) Limos C) Arcillas D) $\text{SiO}_2$ E) $\text{Al}_2\text{O}_3$ F) $\text{TiO}_2\text{G}$ $\text{Fe}_2\text{O}_3$ H) $\text{MnO}$ .	105
	Anexo 19 ANOVAS de los núcleos de sedimento LT01, LT02 y LT03: A) Pb B) Ni C) Cr D) $^{210}\text{Pb}$ E) $^{226}\text{Ra}$ F) TAM G) TAS.	106
	Anexo 20 Tabla de correlación de Pearson de las variables del núcleo de sedimento LT01.	107

Anexo 21	Tabla de correlación de Pearson de las variables del núcleo de sedimento LT02.	108
Anexo 22	Tabla de correlación de Pearson de las variables del núcleo de sedimento LT03.	109

## Índice de tablas

Tabla 1 Coordenadas de núcleos de sedimento recolectados en Laguna de Términos, Campeche.	40
Tabla 2. Porcentaje de recuperación de las concentraciones de elementos mayores en materiales certificados.	44
Tabla 3. Duplicados de las muestras de sedimento para evaluar la precisión.	45
Tabla 4. Resultados de validación para el análisis de Ni, Cr y Pb por EAA en horno de grafito.	46
Tabla 5. Configuración para análisis de Ni por EAA en horno de grafito.	47
Tabla 6. Configuración para análisis de Cr por EAA en horno de grafito	48
Tabla 7. Configuración para análisis de Pb por EAA en horno de grafito.	49
Tabla 8. Valores de concentración de referencia total en la norma internacional. (LEL: nivel de efecto más bajo, SEL: nivel de efecto severo).	50
Tabla 9. Concentraciones naturales de Cr, Ni y Pb en los núcleos LT01, LT02 y LT03 de Laguna de Términos, Campeche.	66
Tabla 10. Factores de enriquecimiento de Cr, Ni y Pb en los núcleos LT01, LT02 y LT03 de Laguna de Términos, Campeche.	67
Tabla 11. Concentraciones de Cr, Ni y Pb en sedimentos de distintos sitios a nivel local, nacional e internacional.	69

## Índice de figuras

Figura 1. Serie de desintegración radioactiva del $^{238}\text{U}$ .	12
Figura 2. Localización del estado de Campeche.	23
Figura 3. Localización de la Laguna de Términos, Campeche.	25
Figura 4. Vías de acceso en el estado de Campeche.	26
Figura 5. Fisiografía y orografía del estado de Campeche.	28
Figura 6. Cuencas hidrológicas en el estado de Campeche.	31
Figura 7. Climas en el estado de Campeche.	34
Figura 8. Geología en la zona de Laguna de Términos, Campeche.	37
Figura 9. Mapa de la Laguna de Términos, Campeche con la ubicación de los núcleos de sedimento LT01, LT02 y LT03.	39
Figura 10. 1) Balanza Sartorius, 2) Mufla Thermolyne y 3) Horno de gravedad Blue M.	42
Figura 11. 1) Perladora de fusión Vulcan y 2) Espectrofotómetro de rayos X Bruker.	44
Figura 12. 1) Agitador Thermo Scientific, 2) Centrifuga IEC, 3) Vasos de digestión (Teflón PFA), 4) Digestor microondas CEM, 5) Espectrómetro de Absorción Atómica y 6) Automuestreador Thermo Scientific.	46
Figura 13. Curva de calibración para Ni.	48
Figura 14. Curva de calibración para Cr.	49
Figura 15. Curva de calibración para Pb.	50
Figura 16. Perfiles de materia orgánica (%) en los núcleos LT01, LT02 y LT03.	52
Figura 17. Perfiles de carbonatos (%) en los núcleos LT01, LT02 y LT03.	53
Figura 18. Distribución de tamaño de grano de los núcleos de sedimento LT01, LT02 y LT03.	54
Figura 19. Diagrama ternario de tamaño de partícula en núcleos de sedimento LT01, LT02 y LT03.	55
Figura 20. Concentración de elementos mayores en el núcleo LT02.	56
Figura 21. Concentración de elementos mayores en el núcleo LT02.	57
Figura 22. Concentración de elementos mayores en el núcleo LT03.	57
Figura 23. Concentraciones de Pb en los núcleos de sedimento LT01 (azul), LT02 (naranja) y LT03 (gris).	58
Figura 24. Perfiles de concentración de Ni en los núcleos de sedimento LT01 (azul), LT02 (naranja) y LT03 (gris).	59
Figura 25. Perfiles de concentración de Cr en los núcleos de sedimento LT01 (azul), LT02 (naranja) y LT03 (gris).	60

Figura 26. Actividad de $^{210}\text{Pb}_{\text{tot}}$ contra profundidad (cm) de los núcleos de sedimento LT01 (azul), LT02 (naranja) y LT03 (gris).	61
Figura 27. Perfiles de las tasas de acumulación másica (TAM) y sedimentaria (TAS) del núcleo de sedimento LT01.	63
Figura 28. Perfiles de las tasas de acumulación másica (TAM) y sedimentaria (TAS) del núcleo de sedimentos LT02.	63
Figura 29. Perfiles de las tasas de acumulación másica (TAM) y sedimentaria (TAS) del núcleo de sedimento LT03.	64
Figura 30. Flujos históricos de Pb, Ni y Cr en el núcleo LT01.	71
Figura 31. Flujos históricos de Pb, Ni y Cr en el núcleo LT02.	72
Figura 32. Flujos históricos de Pb, Ni y Cr en el núcleo LT03.	72

## **Agradecimientos**

A mi mamá y papá por amarme, cuidarme y enseñarme a ser la mejor versión de mi mismo. Gracias por escucharme cuando lo necesitaba y darme la fuerza para seguir adelante.

A mi hermano por ser mi mejor amigo, mi compañero de videojuegos y mi lugar seguro. Por siempre estar junto a mí y darme consejos.

A Fer por darme todo su apoyo y cariño. De alguna forma siempre encontraste la manera de que confiara en mí y en trabajo.

A Dany por ser mi otro cachito y por curarme con palabras. Gracias por ser parte de mi vida.

A mis amigxs de la carrera con los que compartí sueños y noches de desvelo.

A Johnny y a Carlos porque sin ellos la universidad y mi vida no sería la misma.

A mi asesor, el Dr. Jorge Ontiveros por permitirme formar parte del proyecto y por todas las enseñanzas y contribuciones a lo largo de este trabajo.

A la Lic. Susana por tener la paciencia de enseñarme a trabajar en un laboratorio y hacer de estos meses un bonito recuerdo.

A mis compañeras de laboratorio Zubia y Argelia, por compartir este proceso y hacerlo más sencillo y divertido.

A mis sinodales que no sólo revisaron mi trabajo, sino que cada unx de ellxs formó parte esencial en mi estancia por la universidad.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por ofrecerme todos los recursos para que pudiera desarrollarme.

Al Instituto de Ciencias el Mar y Limnología por permitirme usar las instalaciones y recursos.

Al Laboratorio de Geoquímica Isotópica y Geocronología (LGIG) a cargo de la Dra. Ana Carolina Ruiz Fernández por facilitarme la información.

## Resumen

La Laguna de Términos (LT) se localiza en el sureste del país, separada del Golfo de México por una barra de arena calcárea, en donde se sitúa la Ciudad del Carmen. La LT es un ecosistema con alta productividad primaria, por lo que tiene una gran importancia ecológica y económica. En el área se llevan a cabo distintas actividades humanas entre las que se encuentran la agricultura, la ganadería, la pesca, además de procesos industriales, que sumados al desarrollo urbano se han convertido en una fuente de contaminantes en la región.

La presencia de metales pesados en los ecosistemas costeros puede llegar a generar severos problemas ambientales, provocando efectos adversos a la biota y riesgos a la salud, por lo que el presente trabajo tiene como objetivo estudiar las acumulaciones, los enriquecimientos y los flujos históricos de elementos potencialmente tóxicos (Cr, Ni y Pb) presentes en los sedimentos de LT.

Se recolectaron tres núcleos de sedimento (LT01, LT02 y LT03) en febrero de 2021. Estos núcleos fueron fechados por el método de  $^{210}\text{Pb}$ , dando como resultado edades máximas de  $45 \pm 9$  años (1976) en el núcleo LT01,  $38 \pm 13$  años (1983) en el núcleo LT02 y  $145 \pm 84$  años (1876) en el núcleo LT03. Las Tasas de acumulación sedimentaria (TAS) y acumulación másica (TAM) reportaron valores desde 0.03 a 1.93  $\text{cm año}^{-1}$  y desde 0.03 a 0.69  $\text{g cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$ , respectivamente. En cuanto al tamaño de partícula, los sedimentos se clasifican como limos arcillosos, ya que su principal constituyente son los limos (51.8-65.8%), seguido por las arcillas (26.8-38.0%).

El contenido de materia orgánica en los sedimentos representó entre 11.2 y 17.5%, mientras que el contenido de carbonatos fue de 4.1 a 15.7%. Los intervalos de concentración de los elementos mayores y metales traza fueron:  $\text{SiO}_2$ , 28.6-52.3%;  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 7.8-13.4%;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 3.4-5.3%;  $\text{TiO}_2$ , 0.32-0.64%;  $\text{MnO}$ , 0.05-0.07%;  $\text{Pb}$ , 6.89-19.16  $\mu\text{g g}^{-1}$ ;  $\text{Ni}$ , 92.83- 160.76  $\mu\text{g g}^{-1}$ ;  $\text{Cr}$ , 118.63- 292.10  $\mu\text{g g}^{-1}$ . En este marco, el factor de enriquecimiento (FE) de  $\text{Pb}$  fue de menor a moderado (1.02-3.57), el FE de  $\text{Cr}$  ( $<1$ ) no mostró enriquecimiento, mientras que  $\text{Ni}$  mostró un enriquecimiento menor (1-3) en la mayoría de las secciones. De manera general, los flujos de  $\text{Cr}$ ,  $\text{Ni}$  y  $\text{Pb}$  mostraron un aumento en las décadas recientes. Al comparar las concentraciones con los valores de referencia internacionales TEL (nivel umbral de efectos) y PEL (nivel de efectos probables), se observó que las concentraciones de  $\text{Ni}$  podrían tener efectos tóxicos para la biota.

## Abstract

Términos Lagoon (LT) is located in the southeast of Mexico, separated from the Gulf of Mexico by a calcareous-sand barrier, where Ciudad del Carmen is located. The TL is an ecosystem with high primary productivity, which is why it is of great ecological and economic importance. Various human activities are carried out in the area, including agriculture, livestock, fishing, as well as industrial processes, which added to urban development have become a source of pollutants in the region.

Adverse effects on the biota can be caused due to severe environmental problems generated by heavy metals in coastal ecosystems. Therefore, the present work aims to study the accumulations, enrichments, and historical fluxes of potentially toxic elements (Cr, Ni, and Pb) in TL sediments.

Three sediment cores (LT01, LT02 and LT03) were collected in February 2021. The cores were dated by the  $^{210}\text{Pb}$  method, resulting in maximum ages of  $45 \pm 9$  years (1976) in LT01,  $38 \pm 13$  years (1983) in LT02, and  $145 \pm 84$  years (1876) in LT03. Sediment accumulation rates (SAR) and mass accumulation (MAR) were from 0.03 to 1.93  $\text{cm yr}^{-1}$  and from 0.03 to 0.69  $\text{g cm}^{-2} \text{yr}^{-1}$ , respectively. In terms of particle size, the sediments are classified as clayey silt since their main constituents are silts (51.8-65.8%), followed by clays (26.8-38.0%).

The organic matter contents in the sediments represented between 11.2 and 17.5%, while the carbonate contents were from 4.1 to 15.7%. The concentration intervals of the major elements and trace metals were:  $\text{SiO}_2$ , 28.6-52.3%;  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 7.8-13.4%;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 3.4-5.3%;  $\text{TiO}_2$ , 0.32-0.64%;  $\text{MnO}$ , 0.05-0.07%;  $\text{Pb}$ , 6.89-19.16  $\mu\text{g g}^{-1}$ ;  $\text{Ni}$ , 92.83- 160.76  $\mu\text{g g}^{-1}$ ;  $\text{Cr}$ , 118.63- 292.10  $\mu\text{g g}^{-1}$ . Thus, the enrichment factors (EF) for  $\text{Pb}$  was minor to moderate (1.02-3.57), the EF of  $\text{Cr}$  (<1) showed no enrichment, while  $\text{Ni}$  showed minor enrichment (1-3) in most of the core sections. In general, the fluxes of  $\text{Cr}$ ,  $\text{Ni}$ , and  $\text{Pb}$  have shown an increase in recent decades. When comparing the metal concentrations with the international reference values TEL (threshold effect level) and PEL (probable effect level), it was shown that the concentrations of  $\text{Ni}$  could have toxic effects on biota.

## 1. Introducción

Las lagunas costeras son rasgos naturales en todos los continentes, que ocupan el 13% de la línea de costa a nivel mundial (Lasserre, 1979). Estos cuerpos de agua someros, que se encuentran en constante o intermitente conexión con el mar, se caracterizan por recibir aportes de sedimentos y materia orgánica particulada, tanto del continente como de la parte oceánica, favoreciendo altas tasas de productividad primaria y secundaria. México tiene ~11,592.77 km<sup>2</sup> de litoral, dentro del cual se ubican entre 125 y 130 lagunas costeras, ocupando un área de 15,000 km<sup>2</sup> (Lankford, 1977). La importancia de las lagunas radica en su alta productividad primaria que favorece la existencia de una gran biodiversidad, siendo zona de crianza, reproducción y resguardo de distintos organismos (Lara-Domínguez et al., 2011).

Las lagunas son altamente sensibles a los impactos antrópicos y estresores, como la pérdida y alteración de hábitats, sobreexplotación de recursos, aumento en el nivel del mar, tormentas y huracanes, introducción de especies invasoras, subsidencia y turbidez, que pueden ocasionar polución persistente y eutrofización. Además, las áreas de costa son afectadas por las actividades humanas, que se desarrollan cerca de ellas, entre las cuales destacan las descargas domésticas e industriales sin tratamiento, la construcción de caminos, extracción petrolera y desarrollos turísticos, que ocasionan contaminación, así como la pérdida y deterioro de los ecosistemas y recursos costeros. Asimismo, son particularmente susceptibles a los efectos del cambio climático (Kennish y Paerl, 2010; Lara-Domínguez et al., 2011; Saccà, 2016).

Las lagunas costeras son sistemas acuáticos susceptibles a la acumulación de contaminantes (e.g., contaminantes organoclorados, compuestos de hidrocarburos aromáticos policíclicos, metales y metaloides), debido a distintos factores, como los prologados tiempos de residencia de sus aguas (Kennish y Paerl, 2010). De hecho, uno de los principales contaminantes en las zonas costeras urbanizadas, son los metales y metaloides, clasificados como elementos potencialmente tóxicos. Estos elementos, son transportados por distintos mecanismos como las escorrentías o el transporte atmosféricos de largo alcance (De Lacerda, 1994). Cuando los metales son transportados en agua dulce y entran en contacto con agua marina, ocurren distintos procesos que determinan su distribución entre las fases disueltas y particuladas. La complejidad del proceso de la movilización de los elementos metálicos radica en la gran cantidad de factores biogeoquímicos implicados que determinan su destino, transporte y biodisponibilidad

(Ramos y Villalobos, 2015). Páez-Osuna (2005<sup>a</sup>) menciona que existen distintos criterios para clasificar las fuentes de emisión de los metales y metaloides en ambientes marinos y costeros, aunque el principio más utilizado, es si involucran o no, a las actividades humanas (fuentes antropogénicas o naturales), o bien, si se tienen identificadas y localizadas sus fuentes (i.e., puntuales y no puntuales). La movilización natural de los metales se da por distintos procesos, como el intemperismo o meteorización de rocas, la desgasificación, el vulcanismo terrestre y submarino, además de la movilización de los sedimentos marinos. Los metales presentes en el ambiente pueden llegar a resultar dañinos para los seres vivos y su toxicidad dependerá de distintos factores de tipo físicoquímico (salinidad, pH, Eh, dureza) y biológico (edad talla, hábitos alimenticios, madurez).

Laguna de Términos es una de las lagunas costeras más estudiadas desde el siglo XX debido a su importancia ecológica. Se ubica al sur del golfo de México y es la de mayor volumen ( $\sim 5,000 \times 10^6 \text{ m}^3$ ) en todo el país. Debido a sus características tan particulares en 1994 fue nombrada Área de Protección de Flora y Fauna y en el año 2004 fue declarada sitio Ramsar. El valor de la región de LT recae en su aspecto ecológico, social, político y ambiental, ya que es fuente de alimentos y recursos maderables, así como de desarrollo industrial, crecimiento urbano y agropecuario (Ramos y Villalobos, 2015). La región tropical del sureste de Campeche tiene un aporte sedimentario particular, ya que se encuentra en la transición entre las calizas de la península de Yucatán y los terrenos aluviales del sistema Grijalva-Usumacinta (Coll de Hurtado, 1975). Los tres principales aportes por parte de las descargar de ríos que recibe LT, provienen de los ríos Chumpán, Candelaria y principalmente del río Palizada (Ontiveros-Cuadras et al., 2022). La mayoría de los elementos metálicos utilizados por la industria en la región costera del Golfo de México, se han relacionan con el refinamiento de petróleo, la producción y uso de fertilizantes y la minería, aunque también se han identificado en los efluentes domésticos que enriquecen las descargas de los ríos en Ni, Cr, Cu, Pb, Zn, Cd y Ag (Páez-Osuna, 2005b). La LT ha tenido un crecimiento desequilibrado, aumentando los impactos que se generan en la zona (Ramos y Villalobos, 2015). Por tal razón el presente trabajo busca determinar las concentraciones naturales y los factores de enriquecimiento de Ni, Cr y Pb, para así establecer si existe algún riesgo toxicológico, además de reconstruir los cambios históricos de sus flujos en los núcleos de sedimento.

## 1.1 Justificación

La Laguna de Términos (LT) forma parte del complejo ecológico de la llanura costera, en donde se llevan a cabo procesos deltaicos del Sistema de ríos Grijalva-Usumacinta. La región posee una gran productividad natural y una alta biodiversidad. Cuenta con distintos hábitats críticos que cobran gran relevancia debido a que son área de refugio, anidación y crianza para distintas especies migratorias. Como resultado del crecimiento de los asentamientos humanos y las actividades económicas que se desarrollan en el área, se han observado distintas afectaciones ecológicas. Conocer las condiciones actuales del humedal es de vital importancia para gestionar acciones que logren prevenir, mitigar y remediar los efectos del cambio global en LT. En consecuencia, este trabajo busca estudiar la acumulación, el enriquecimiento y los flujos históricos de elementos mayores y metales traza presentes en los sedimentos de la LT a partir del análisis de tres núcleos de sedimento fechados con  $^{210}\text{Pb}$ . De esta manera se podrá conocer la influencia antrópica en la composición química de los sedimentos a través del tiempo (~ 100 años).

## **1.2 Objetivo general**

Determinar las concentraciones naturales, enriquecimiento y los flujos de metales (Cr, Ni, Pb) en laguna de Términos, Campeche a través de tres núcleos de sedimento fechados con  $^{210}\text{Pb}$ .

## **1.3 Objetivos específicos**

1. Establecer las concentraciones de Cr, Ni y Pb en las muestras de sedimento.
2. Determinar las concentraciones naturales y los factores de enriquecimiento de los metales analizados.
3. Reconstruir los cambios históricos de los flujos de Cr, Ni y Pb en los núcleos de sedimento.

## **2. Marco teórico**

### **2.1 Humedales**

Los humedales son extensiones de marismas, pantanos y turberas en donde el agua es el principal factor controlador del medio y la vida que lo compone, tanto vegetal como animal. Son superficies continentales cubiertas por aguas poco profundas de manera permanente o temporal debido a un régimen natural o artificial, en donde el agua puede fluir o encontrarse estancada y su salinidad es variable. De acuerdo con la definición de la Convención de Ramsar, los humedales están conformados por distintos hábitats interiores como pantanos, turberas, llanuras de inundación, ríos y lagos, así como zonas costeras entre las que se encuentran las marismas de agua salada, los manglares, los bajos intermareales de lodo y las praderas de pastos marinos, además de los arrecifes de coral y otras áreas marinas, cuya profundidad no supere los seis metros en marea baja. También incluye humedales artificiales, como presas, embalses, arrozales y estanques (Ramsar, 2016).

### **2.2 Lagunas costeras**

Las lagunas costeras son cuerpos de agua epicontinentales, ubicadas en todos los continentes (Saccà, 2016), que se desarrollan en la interfaz entre los ecosistemas terrestres y marinos (Gonenc y Wolfin, 2004). Las lagunas se definen como una depresión en la costa que se encuentra en un nivel más bajo que el promedio máximo de las mareas altas. Comúnmente, tienen una orientación paralela a la costa, separadas del océano por algún tipo de barrera, ya sea física o de tipo hidrodinámica, como lo sería por la presencia de agua dulce y agua de mar. Las lagunas se encuentran conectadas con el océano por una o varias bocas o entradas restringidas, que pueden mantenerse abiertas o de manera intermitentemente (Lankford, 1977). Son cuerpos de agua someros sujetos o no a la mezcla por mareas. Su salinidad varía mucho, desde agua dulce a aguas hipersalinas, dependiendo del balance hidrológico y están catalogadas como los ecosistemas que poseen las tasas más elevadas de productividad (Ramos y Villalobos, 2015). Son sistemas ecológicos naturales, seminaturales y dominados por el hombre que en conjunto cubren un promedio del 6% de la superficie terrestre de la Tierra (Gonenc y Wolfin, 2004).

Las lagunas costeras, de manera general, se formaron en donde las bocas de los valles o tierras de poca altitud fueron sumergidas por el mar durante las últimas etapas de la transgresión marina mundial del Cuaternario Tardío (Holoceno; Bird, 1994). En escala geológica estos sistemas no prevalecen mucho tiempo debido a su eficiencia de filtrado, los

cambios en el nivel del mar como respuesta al cambio climático global, la actividad tectónica local, así como a las actividades antropogénicas (e.g., presas, bombeo de agua, cambios de uso de suelo; Martín y Landim, 1994). Las lagunas experimentan mecanismos de forzamiento como lo son los aportes fluviales, estrés producido por las corrientes de viento, mareas, precipitación- evaporación y el balance de temperatura en la superficie, dando como resultado distintos procesos costeros para cada cuerpo de agua. Tanto el balance hídrico, salinidad, calidad de agua, así como la eutrofización, dependerán de la circulación al interior de la laguna, así como su interacción con el océano (Kjerfve, 1994).

### **2.3 Clasificación de las lagunas costeras**

Existen distintas clasificaciones de las lagunas costeras, las cuales se basan en las características físicas, su génesis, así como los procesos que se llevan a cabo en su interior. Kjerfve (1989) subdividió a las lagunas costeras en tres tipos geomorfológicos, de acuerdo con el intercambio de agua que tienen con el océano: 1) lagunas ahogadas, que consisten en una serie de cuerpos elípticos conectados por un canal delgado; 2) lagunas restringidas, que son cuerpos de agua largos y anchos, usualmente orientadas paralelamente a la costa y que presentan dos o más canales de entrada. Este tipo de lagunas presentan una circulación definida, además tienen una gran influencia por parte del viento, están bien mezcladas verticalmente y su salinidad varía de salobre a salinidades oceánicas; 3) lagunas con filtraciones, que son cuerpos de agua elongados paralelos a la línea de costa con muchos canales oceánicos de entrada, donde las corrientes de marea son lo suficientemente fuertes como para superar la acción de las olas y la deriva litoral. Por otro lado, Lankford (1977) clasificó a las lagunas dependiendo del origen de la depresión y las características de la barrera como: 1) erosión diferencial, que usualmente son valles inundados con depresiones por disolución; 2) sedimentación terrígena diferencial, asociada a sistemas fluviales y deltaicos; 3) plataforma interna con barrera; 4) orgánica, normalmente por corales, manglar u otros organismos y 5) tectónico-volcánico, relacionado a fallas, plegamiento o vulcanismo.

### **2.4 Procesos sedimentarios**

Los procesos sedimentarios incluyen a la erosión, transporte, depósito, acumulación, diagénesis y la consolidación del sedimento depositado. En las lagunas costeras, estos procesos se llevan a cabo gracias al aporte tanto de energía como de materia por parte de los caudales de los ríos, mareas, oleaje, gradientes de densidad y el viento. La disipación

de energía permite que los sedimentos se transporten, mezclen, clasifiquen y acumulen, modificando constantemente la morfología de las cuencas. Estos procesos sedimentarios no están regidos únicamente por la hidrodinámica, sino también por las características físicas de las partículas, entendidas como su tamaño, forma, densidad y composición. Los procesos no son continuos sino intermitentes y estacionales (Nichols y Booh, 1994).

## **2.5 Fuentes de sedimentos.**

De manera general, las partículas de sedimentos se originan por: a) la meteorización física y química de las rocas ígneas, metamórficas o sedimentarias preexistentes, que se conocen como sedimentos clásticos terrígenos; b) por la precipitación química de minerales y sales, conocidos como sedimentos ortoquímicos; c) por la precipitación bioquímica de varios minerales, sedimentos biogénicos. Entonces, el tipo de sedimento que se encuentra en un área depende del clima, la química del agua, la productividad orgánica y la ubicación geográfica (Leeder, 1982).

Los sedimentos depositados en las lagunas provienen de distintas fuentes, tanto externas como internas. El depósito de sedimentos en el fondo de una laguna no ocurre de manera uniforme, ya que por un lado se tienen las fuentes puntuales, como las desembocaduras de los ríos, mientras que, por otro, están las fuentes lineares, como las barras. Las fuentes de sedimentos se pueden clasificar utilizando las características del material depositado, como es la textura, redondez de las partículas, así como la composición mineralógica o química. Dentro de las fuentes externas, una de las principales es la fluvial, sobre todo en las lagunas cercanas a deltas o en lagunas dentro de cuencas hidrográficas con terrenos inclinados, grandes escurrimientos y alta producción de sedimentos (Nichols y Booh, 1994). Las lagunas que tienen como principal aporte el fluvial, acumulan sedimentos que van desde arena gruesa hasta limo y arcilla. El material más grueso se deposita en la desembocadura de los ríos, esparciéndose por la orilla de la laguna por acción de las olas, mientras que el sedimento más fino se transporta al interior de la laguna (Bird, 1994). Sin embargo, existen otras fuentes importantes como es la marina, sobre todo en aquellas lagunas que poseen un transporte activo de mareas a través de entradas que tienen un intercambio con el mar. Otra fuente, que en muchos casos es subestimada, es el aporte de sedimento proveniente de la erosión de las orillas de las lagunas y acantilados, producto del crecimiento de poblaciones humanas cerca de estos cuerpos de agua. Las lagunas se han vuelto cuerpos receptores de los desechos industriales y urbanos, entre los que se encuentran los lodos orgánicos de aguas residuales,

partículas de carbón, cenizas, escombros de construcciones, hidrocarburos, así como desechos industriales sólidos y químicos. De igual forma, entre las fuentes internas se incluyen los productos derivados de la alta productividad, como son conchas, diatomeas, foraminíferos, material algáceo y desechos orgánicos, incluidos los detritos de pantanos o manglares; otra fuente interna importante es la precipitación química de minerales carbonatados y evaporíticos (Nichols y Booh, 1994).

## **2.6 Caracterización de sedimentos**

### **2.6.1 Granulometría**

Los sedimentos pueden clasificarse de distintas formas; esto tiene el fin de describir no solo sus composición y propiedades físicas, sino evaluar su transporte, ambiente de depósito y génesis. Por ejemplo, una medición cuantitativa es el tamaño de partícula. Para realizar esta clasificación se debe utilizar una escala paramétrica. Es así como Udden (1898) propuso una escala basada con una relación constante de 2 entre clases sucesivas y fue Wentworth (1922), quien la modificó asignando nombres a los intervalos de clase. Por otro lado, Kumbein (1938) implementó la escala phi ( $\phi$ ), ajustando la clasificación de Wentworth a una escala logarítmica (Folk, 1980). De esta manera, la escala más utilizada para la mayoría de las partículas clásticas y carbonatadas es la de Udden-Wentworth. Existen distintos métodos para medir el tamaño de partícula y su uso depende en gran parte del estado físico de los sedimentos, así como el tamaño y la forma individual de los granos (Leeder, 1982).

### **2.6.2 Materia orgánica y carbonatos**

Los sedimentos calcáreos y las rocas sedimentarias están formadas por tres componentes: materia orgánica (MO), uno o más carbonatos y material elástico sin carbonatos (Dean, 1974). Conocer el porcentaje de MO en los sedimentos es de gran importancia, ya que es fundamental en distintos procesos dentro de un ecosistema como es la formación de suelo, la retención de agua, la acumulación de sustancias químicas de origen antropogénico (e.g., elementos traza), el secuestro de carbono, el ciclo de los nutrientes, así como el suministro de energía a microorganismos. La MO reacciona con los metales formando complejos de cambio o quelatos; además, puede formar complejos organometálicos favoreciendo la solubilidad, disponibilidad y dispersión de los metales, ya que pueden degradarse por acción de los organismos que habitan en el suelo. Por otro

lado, la importancia de cuantificar el contenido de carbonatos presentes en los sedimentos se debe a que distintos metales como el Cd tienden a ser adsorbidos por esta fracción; además, la presencia de estos minerales garantiza un pH alto, propiciando un ambiente en donde los metales precipiten (Huertos y Romero, 2008).

### 2.6.3 Fechado de sedimentos con $^{210}\text{Pb}$

El  $^{210}\text{Pb}$  es un radionúclido de origen natural que forma parte de la serie de desintegración del  $^{238}\text{U}$  (Figura 1).

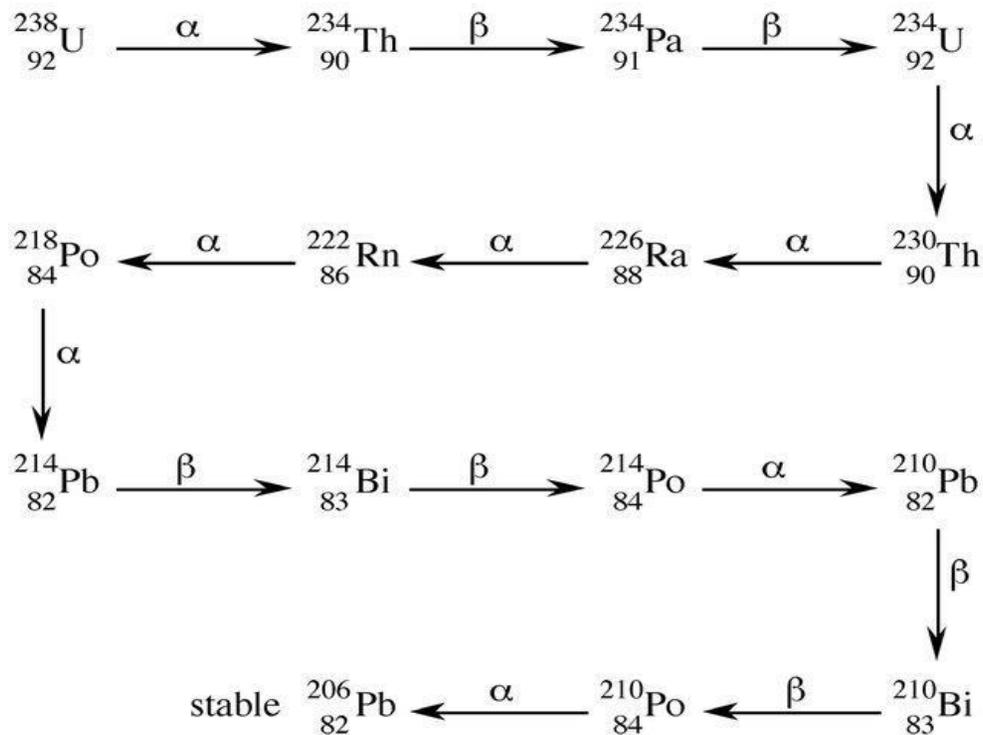


Figura 1. Serie de desintegración radioactiva del  $^{238}\text{U}$ .

Su periodo de desintegración es de  $T_{1/2} = 22.23 \pm 0.12$  años, por tanto, su actividad puede ser detectada hasta 5 veces, antes de alcanzar el horizonte de equilibrio, permitiendo el fechado de sedimentos entre <100 y 150 años. El  $^{210}\text{Pb}$  procede de la desintegración de  $^{226}\text{Ra}$  ( $T_{1/2} = 1600$  años). Las fuentes del radionúclido son diversas; sin embargo, en zonas costeras poco profundas el principal aporte de  $^{210}\text{Pb}$  a los sedimentos es atmosférico, el cual se deposita en su mayoría por vía húmeda. No obstante, los ríos y escorrentías también son fuentes importantes del radionúclido. Los sedimentos contienen  $^{210}\text{Pb}$  producido *in situ* ( $^{210}\text{Pb}$  soportado), por la desintegración del  $^{226}\text{Ra}$  contenido en las rocas. El  $^{210}\text{Pb}$  total ( $^{10}\text{Pb}_{\text{total}}$ ) en los sedimentos está en desequilibrio con el  $^{210}\text{Pb}$  soportado ( $^{226}\text{Ra}$ ) y la diferencia entre estos, se denomina  $^{210}\text{Pb}$  en exceso ( $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ ). La actividad de  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  es un

parámetro fundamental en el fechado de núcleos sedimentarios (radiocronología), ya que analizando su desintegración con respecto a la profundidad se pueden estimar las fechas de formación de los sedimentos. De igual forma, la radiocronología con  $^{210}\text{Pb}$  permite la estimación de tasas de acumulación sedimentaria (TAS,  $\text{cm año}^{-1}$ ) y másica (TAM,  $\text{g cm}^2 \text{ año}^{-1}$ ), calculadas de la siguiente forma (Sánchez-Cabeza y Ruiz-Fernández, 2012):

$$TAS = \frac{\Delta z_i}{\Delta t_i} \quad TAM = \frac{\Delta m_i}{\Delta t_i}$$

En donde  $\Delta z_i$  es el espesor de la sección  $i$  (cm),  $\Delta m_i$  es la profundidad másica media de la sección  $i$  ( $\text{g cm}^2$ ) y  $\Delta t_i$  es el periodo de formación de la sección  $i$ , calculado de la siguiente forma:

$$\Delta t_i = t(i) - t(i - 1)$$

El  $t(i)$  es la edad de la capa  $i$  en años. De manera analítica la concentración de  $^{210}\text{Pb}_{\text{total}}$  en sedimentos se puede determinar por espectrometría gamma, espectrometría alfa, centelleo líquido y conteo beta (Sánchez-Cabeza et al., 2012; Sánchez-Cabeza y Ruiz Fernández, 2012).

## 2.7 Elementos potencialmente tóxicos

Las lagunas costeras al ser ambientes de depósito, actúan como sumideros temporales para la mayoría de metales traza (e.g., Cr, Ni, Pb), ya que filtran y retienen materiales suministrados por los ríos, atmósfera y el océano durante largos periodos de tiempo con una acumulación que depende de las tasas de sedimentación y las concentraciones de metales, así como de los procesos biogeoquímicos (e.g., degradación de materia orgánica en condiciones anóxicas y sustancias orgánicas liberadas por el fitoplancton; Kjerfve y Magill, 1989; De Lacerda, 1994).

Los metales son elementos lustrosos, maleables, dúctiles y con la capacidad de conducir electricidad, que pueden formar cationes y óxidos alcalinos. Dentro del grupo de los metales existe un subgrupo llamado metales pesados, que, si bien no se tiene una definición única, ha resultado muy útil para clasificar a aquellos elementos potencialmente tóxicos (EPT; Gutiérrez-Ruiz et al., 2009). Por un lado, Páez-Osuna (2005b) los define como un grupo de elementos con pesos atómicos que varían entre 63.656u y 200.590u, caracterizado por tener una distribución electrónica externa similar, dividiéndolos en dos categorías: 1) los metales de transición que son esenciales para el metabolismo en bajas concentraciones, pero tóxicos en altas concentraciones; 2) los metales y metaloides que generalmente no son requeridos en el metabolismo de los organismos y son tóxicos en

pequeñas concentraciones. Alloway (2013) menciona que el término metal pesado hace referencia a aquellos metales y metaloides de masa atómica relativamente alta ( $>5 \text{ g cm}^{-3}$ ). De igual forma, Duffus (2002) menciona que generalmente se utiliza el término metal pesado para definir aquellos metales, semimetales y metaloides asociados con la contaminación y la ecotoxicidad. Los metales pesados no se degradan, pero pueden ser disueltos por agentes físicos y químicos y de esta manera ser lixiviados. Algunos metales pesados pueden llegar a formar complejos solubles, los cuales son transportados y distribuidos a los ecosistemas hasta incorporarse en la cadena trófica (Londoño et al., 2016). Los EPT que contempla la norma mexicana (Norma-147-SEMARNAT/SSA1-2004), debido a que su biodisponibilidad y su capacidad de bioacumulación pueden generar riesgos a la salud y al ambiente son: Ag, As, Ba, Be, Cd, Cr, Hg, Ni, Pb, Se, Tl y V. Al contrario, la EPA (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos) no incluye a V y Ba, pero sí a Sb, Cu y Zn (Huertos y Romero, 2008).

Los EPT dentro de una laguna costera son susceptibles a concentrarse en la biota, ya que prácticamente no se degradan, por lo que los efectos en el medio ambiente son catalogados de largo plazo. La gran mayoría de los aportes de EPT a las lagunas se da por procesos fluviales, descarga directa de afluentes urbanos e industriales que pueden estar enriquecidos con Pb, Zn, Cr y Cu, el transporte atmosférico y las actividades *in situ* que incluyen al transporte marítimo y otras actividades portuarias (Nichols y Booh, 1994).

## **2.8 Procesos de adsorción de metales traza en sedimentos**

La adsorción es uno de los últimos procesos que remueve a los metales traza del ciclo hidrológico, siendo así que, el último sumidero son los sedimentos. Las principales formas de sorción son la adsorción, la quimiosorción y el intercambio iónico. La adsorción física tiene lugar en la superficie externa de una partícula y está regida por las fuerzas de Van der Waals de las interacciones ion-dipolo o dipolo-dipolo, que son relativamente débiles. La sorción por intercambio iónico es un proceso químico en el que las cargas negativas y positivas de la red mineral (e.g., arcillas) se atraen por iones de carga opuesta que sean intercambiables por iones de la solución. La adsorción química se da por la formación de asociaciones químicas entre iones o moléculas de la solución y las partículas de las superficies (Salomons y Förstner, 1984). Alloway (2013) menciona que, aunque la adsorción se refiere a la retención de iones en superficies sólidas del suelo por intercambio iónico y adsorción específica, comúnmente es conocida como sorción, mientras que la desorción hace referencia a la liberación de iones de los diversos mecanismos de retención.

En contraste, la movilidad de los metales pesados es muy baja; la capacidad de los sedimentos para retener a los contaminantes metálicos depende del pH, textura, mineralogía, contenido de materia orgánica, carbonatos, óxidos e hidróxidos de Fe y Mn, condiciones redox y la salinidad (Huertos y Romero, 2008). Por ejemplo, una vez que los ríos descargan sus aguas en una laguna costera, ocurre una deposición de partículas finas debido al decremento en la velocidad de la corriente, seguido de la floculación de partículas de arcillas cargadas negativamente y una disminución general de la solubilidad de las especies de metales provocando su acumulación gradual en los sedimentos (Salomons y Förstner, 1984). Los metales depositados son influenciados por las características del sedimento, siendo uno de los parámetros más importantes el tamaño de grano, ya que los sedimentos finos tienen una mayor área superficial (i.e., en comparación con las partículas gruesas) que contribuye a conglomerar cantidades mucho más altas de metales en comparación con las arenas (Osuna-López et al. 1986).

## **2.9 Cromo**

El cromo (Cr) es un elemento químico de número atómico 24 (peso atómico de 51.996u), dentro del grupo 6 de la tabla periódica de elementos. Es un metal de transición duro, frágil, de un color grisáceo y brillante, resistente a la corrosión. Se encuentra distribuido en el aire, agua, suelo y constituye el 0.0122% de la corteza terrestre. Comúnmente se le encuentra como Cr (0), Cr (III) y Cr (VI), siendo esta última, la especie más tóxica y la menos estable. El Cr (III) es esencial en el metabolismo de los seres humanos, su deficiencia se relaciona con el decremento de la tolerancia a la glucosa, en algunas formas de diabetes y en decesos cardiovasculares. El metal puede existir en estado líquido, sólido o gaseoso, dependiendo de su estado de oxidación. Las altas concentraciones de Cr en ambientes naturales se atribuyen a las emisiones industriales, descargas de aguas residuales, ojos de perforación, la quema de combustibles fósiles, así como a la quema de basura. El consumo de agua con altas concentraciones de Cr (VI) puede llegar ocasionar problemas intestinales, enfermedades gástricas y hepáticas. Exposiciones a concentraciones de  $0.1 \text{ mg m}^{-3}$  en el aire pueden llegar a ocasionar cáncer de piel. El Cr (VI) también es considerado un elemento genotóxico y citotóxico para bacterias y organismos eucariontes; por otro lado, el Cr (III) se precipita a un pH neutro y es mucho menos tóxico que el Cr (IV). Su mineral más común es la cromita  $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ , además de la crocoita  $\text{PbCrO}_4$ . Sus compuestos son comúnmente usados en pigmentos y en la fabricación de ferroaleaciones, empleadas en elaboración de acero inoxidable (Páez-Osuna, 2005a; Celis-Hernández, 2006; Covarrubias, 2017;).

## 2.10 Níquel

El níquel (Ni) es un elemento químico con número atómico de 28 (peso atómico de 58,6934u), en el grupo 10 de la tabla periódica. Es un metal de transición duro pero flexible, con lustre brillante color gris claro. Se encuentra en la naturaleza como componente de silicatos, sulfuros o arseniuros. Las sales solubles de Ni, incluyen al cloruro de níquel ( $\text{NiCl}_2$ ), sulfato de níquel ( $\text{NiSO}_4$ ) y nitrato de níquel ( $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$ ). El elemento constituye el 0.01% de la corteza terrestre, su mena más común es la millerita ( $\text{NiS}$ ), asociada a pirita ( $\text{FeS}_2$ ) y calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ). El Ni se usa en la elaboración de aleaciones, monedas, plomería industrial, bujías, piezas de maquinaria, acero inoxidable, cables de resistencia de níquel-cromo, como catalizador en reacciones de hidrogenación y en los electrodos de las baterías y celdas de combustión. Algunos compuestos importantes del elemento son NiO,  $\text{NiCl}_2$  y NiS (Celis-Hernández et al., 2006) y sus fuentes mayores comprenden la quema de combustible diesel, aceites lubricantes, recubrimientos metálicos, desgaste de pastillas de freno, pavimentación asfáltica, fertilizantes fosfatados y baterías de almacenamiento (Sutherland, 2000). El Ni es un elemento esencial para algunos animales, como los seres humanos. La inhalación de este metal puede causar grandes daños a los pulmones y riñones, mientras que, su contacto prolongado con la piel causa dermatitis y la inhalación de polvo con Ni cáncer pulmonar. La EPA ha clasificado el polvo de refinería de Ni y el subsulfuro de Ni como carcinógenos humanos del Grupo A, y el carbonilo de Ni como carcinógeno humano probable del Grupo B2 (EPA, 2016).

## 2.11 Plomo

El plomo (Pb) es un metal divalente con número atómico de 82 (peso atómico de 207.2u), de color gris azulado, con lustre brillante y maleable. Se encuentra presente en todo el mundo en pequeñas cantidades (0.002%), y es catalogado como metal no esencial y uno de los más movilizados por actividades antropogénicas. El Pb forma sales (poco solubles), óxidos y compuestos organometálicos. Tiene afinidad por los grupos sulfhidrilos debido a su electro positividad. El Pb es liberado al ambiente durante los procesos de fundición, procesamiento de metales, reciclamiento de baterías ácidas, a partir de jales mineros, así como por el uso de gasolinas con Pb. El elemento se obtiene a partir de minerales como la galena ( $\text{PbS}$ ), la anglesita ( $\text{PbSO}_4$ ) y la cerusita ( $\text{PbCO}_3$ ), además se encuentra en metales de U y Th. En la industria metalúrgica se usa para formar aleaciones con estaño, cobre,

arsénico, bismuto, cadmio y sodio. El elemento se usa en la gasolina como aditivo antidetonante, como pigmento, en aparatos electrónicos, insecticidas, municiones, cerámicas y joyería. Debido a su similitud con el Ca, compite en los procesos celulares al nivel de las mitocondrias y algunas funciones neurológicas. Por otro lado, el Pb también perturba a los ácidos nucleicos provocando un incremento o decremento en la síntesis proteica. Una exposición prolongada al Pb puede ocasionar retraso en el desarrollo mental e intelectual en los niños, así como hipertensión y enfermedades cardiovasculares en los adultos. El Pb y sus compuestos están clasificados en el grupo 2B, como probablemente cancerígenos para el ser humano (Páez-Osuna, 2005a; Volke-Sepulveda et al., 2005; Celis-Hernández et al., 2006; Londoño, 2016).

## 2.12 Normalización

Existen distintos factores que influyen en la sorción de los metales y metaloides en los sedimentos, uno de estos factores es el tamaño de grano; de esta manera, en cuanto menor sea el tamaño de las partículas habrá una mayor área de contacto en la cual pueden interactuar los contaminantes metálicos, lo que ocasiona una mayor concentración de metales en los sedimentos finos (limos, arcillas) (De Lacerda, 1994; Chapman et al., 1996). Con el fin de compensar la variabilidad mineralógica y de tamaño de grano en los núcleos de sedimentos, se utiliza el método de normalización con algún elemento de referencia (ER; e.g., Al, Li, Ti, Fe) que presente una correlación positiva significativa con la variación del tamaño de grano (Ontiveros-Cuadras et al., 2015).

## 2.13 Factor de enriquecimiento

El factor de enriquecimiento (FE) se utiliza en el análisis de las reconstrucciones de patrones de depósito de metales y metaloides, con el fin de evaluar si las concentraciones de estos elementos superan los valores naturales o de fondo para un área de estudio en específico. Para cada uno de los elementos se calculó con la siguiente fórmula (Glasby y Szefer, 1998):

$$FE = \frac{[C_{muestra}]/[Al_{muestra}]}{[C_{CN}]/[Al_{CN}]}$$

En donde  $C_{muestra}$  es la concentración del metal en la muestra de sedimento,  $Al_{muestra}$  es la concentración de Al en la muestra,  $C_{CN}$  es la concentración natural, la cual se obtuvo a partir del promedio de las secciones más profundas del núcleo más antiguo (> 100 años), donde

el aporte antropogénico de metales es poco probable, y  $Al_{CN}$  es la concentración natural promedio de Al (Green-Ruiz y Páez-Osuna, 2001). Si el valor del FE es igual a la unidad, significa que el elemento fue incorporado al sedimento a partir de una fuente predominantemente litogénica; al contrario, si el valor del FE es mucho mayor a la unidad, es un indicador de que el elemento fue incorporado al sedimento a partir de un aporte antropogénico (Glasby y Szefer, 1998). Essien et al. (2022) propusieron un sistema de categorización del grado de contaminación de los sedimentos, basado en los siguientes valores:

- 1) FE <1 No enriquecimiento.
- 2) FE 1-3 Enriquecimiento menor.
- 3) FE 3-5 Enriquecimiento moderado.
- 4) FE 5-10 Enriquecimiento moderadamente severo.
- 5) FE 10-25 Enriquecimiento severo.
- 6) FE 25-50 Enriquecimiento muy severo.
- 7) FE >50 Extremadamente enriquecido.

### 3. Antecedentes

#### 3.1 Local

Desde finales del siglo pasado se han realizado diversos estudios en ambientes costeros, estuarinos y lagunares con el fin de conocer los flujos de metales pesados en los sedimentos, debido al riesgo que estos representan a la salud de las personas (Ponce-Vélez y Botello, 1991). De igual manera, en México ha cobrado importancia determinar la concentración de elementos traza presentes en los cuerpos lagunares para conocer los procesos internos (e.g., circulación, diagénesis), así como establecer sus niveles naturales y enriquecimientos (Vázquez, 1999). Es así que, Ponce-Vélez y Botello (1991) recolectaron 16 muestras de sedimentos superficiales en LT durante agosto de 1985. Determinaron que el área este de LT presenta una concentración promedio de Ni de  $33.0 \mu\text{g g}^{-1}$ ,  $43.5 \mu\text{g g}^{-1}$  para Cr y  $42.5 \mu\text{g g}^{-1}$  para Pb. Al contrario, para la parte oeste de la laguna, reportaron valores de  $73.9 \mu\text{g g}^{-1}$  para Ni,  $54.8 \mu\text{g g}^{-1}$  para Cr y  $23.1 \mu\text{g g}^{-1}$  para Pb. Los autores indican que existen incrementos en las concentraciones de los metales analizados, con respecto a trabajos previamente realizados en la zona, posiblemente relacionados con el aumento de las actividades humanas e industriales; además, se sugiere que el río Palizada es una fuente importante de metales para LT. Por su parte, Vázquez et al. (1999) describieron las concentraciones de Ni ( $36.1\text{-}116 \mu\text{g g}^{-1}$ ), Cr ( $13.7\text{-}125 \mu\text{g g}^{-1}$ ) y Pb ( $1.45\text{-}23.8 \mu\text{g g}^{-1}$ ), en 15 muestras de sedimentos superficiales recolectadas en la Laguna Pom-Atasta, entre septiembre de 1996 y mayo de 1997. Se determinó que la contaminación por metales en los sedimentos tiene un origen antropogénico. De esta misma forma Rosas y Ponce (2004) analizaron las concentraciones de elementos traza en 14 muestras de sedimentos superficiales en los afluentes de LT, Palizada-del Este (Cr:  $6.73\text{-}109.52 \mu\text{g g}^{-1}$ ; Ni:  $12.66\text{-}133.39 \mu\text{g g}^{-1}$ ; Pb:  $0.15\text{-}19.78 \mu\text{g g}^{-1}$ ) y Candelaria-Panlau (Cr:  $12.66\text{-}133.39 \mu\text{g g}^{-1}$ ; Ni:  $25.67\text{-}68.95 \mu\text{g g}^{-1}$ ; Pb:  $6.41\text{-}12.93 \mu\text{g g}^{-1}$ ). Por otro lado, Gunn et al. (2012) recolectaron en enero del 2000, un núcleo de sedimento de 2.95 m longitud a unos 15 m del cauce principal del río Candelaria, para analizar 22 elementos (Al, As, B, Ba, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, S, Se, Si, Zn), utilizando el método de espectrometría de masa con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS); además, el núcleo se fechó por espectrometría de masas con acelerador (AMS), dando una edad máxima de 5500 años. Se reportaron valores de 46.1 a  $117.8 \mu\text{g g}^{-1}$  para Ni, de 28.9 a  $126.0 \mu\text{g g}^{-1}$  para Cr y de 1.5 a  $468.4 \mu\text{g g}^{-1}$  para Pb.

Además, De La Cruz-Landero (2013), realizó un estudio, a partir de un muestreo aleatorio de sedimentos superficiales en cuatro sitios de manglares ubicados al interior de

LT, en donde se determinaron concentraciones entre 9.0 y 6.0  $\mu\text{g g}^{-1}$  de Pb y entre 31.0 y 82.0  $\mu\text{g g}^{-1}$  para Ni. En este trabajo se señala que la concentración de ambos metales se relaciona con el vertido de residuos sólidos de los rellenos sanitarios y aguas residuales hacia los ríos y lagunas del área que, al encontrarse con un ambiente altamente salino, propicia su liberación. Asimismo, en el trabajo de Magallanes-Ordóñez et al. (2015), se tomaron 17 muestras de sedimento superficial en 4 zonas de LT, reportando valores entre 13.5 a 164.0  $\mu\text{g g}^{-1}$  para Ni y 3.6 a 13.7  $\mu\text{g g}^{-1}$  para Pb. Estos valores se atribuyeron a la entrada de material terrígeno en el área de Boca del Carmen, mientras que, en Puerto Real, la influencia fue mayormente biogénica. Igualmente, Cuevas-Madrid et al. (2018), recolectaron tres núcleos en Isla de Carmen en abril de 2014, en los que determinaron el contenido Ni (4.2-22.4  $\mu\text{g g}^{-1}$ ), Cr (55.0-353.0  $\mu\text{g g}^{-1}$ ) y Pb (1.2-3.1  $\mu\text{g g}^{-1}$ ), observando un incremento en las concentraciones de estos elementos traza hacia las secciones más profundas de los núcleos, que relacionaron al uso de gasolinas y al aporte de material terrígeno (i.e., rocas máficas-ultramáficas) por el río Usumacinta. Durante agosto de 2019, Celis-Hernández et al. (2020) utilizaron sedimentos superficiales de 36 sitios de manglares en Isla de Carmen, Campeche, para establecer las concentraciones de Ni (15.0-96.0  $\mu\text{g g}^{-1}$ ), Cr (57.0-289.0  $\mu\text{g g}^{-1}$ ) y Pb (3.0-111.0  $\mu\text{g g}^{-1}$ ), que vincularon a fuentes litogénica (rocas máficas como andesita y basalto) y antropogénicas (e.g., aguas residuales, combustibles de las embarcaciones). Uno de los estudios más recientes en el área, es el publicado por Ontiveros-Cuadras et al. (2022), que utilizaron 3 núcleos de sedimentos de pastos marinos (sitio La Deseada, al norte de LT) fechados con  $^{210}\text{Pb}$ , para establecer las concentraciones de Ni (9.4-33.7  $\mu\text{g g}^{-1}$ ), Cr (65-136  $\mu\text{g g}^{-1}$ ) y Pb (3.0-5.3  $\mu\text{g g}^{-1}$ ). Se encontraron enriquecimientos menores para Ni, en algunas secciones de los núcleos, además de concentraciones de Ni y Cr que sobrepasaban los niveles umbral (TEL) reportados por Buchmann (2008), que sugieren que los efectos biológicos adversos podrían ocurrir raramente en la biota bentónica del sitio. En este estudio se señaló como principales factores que influyen en la acumulación de Ni, Cr y Pb, son la reciente salinización (debido a un aumento en el nivel del mar) y entrada de materiales terrígenos, debido al cambio de uso de suelo; también, observaron un incremento en los flujos de metales a partir de los 2000's, lo cual coincide con el desarrollo urbano e industrial en Ciudad Carmen.

De igual forma, se han realizado estudios sobre la acumulación de metales y metaloides en la región de LT, como el de Macías-Zamora et al. (1998), quienes publicaron un estudio en el que analizaron 26 núcleos de la Sonda de Campeche, que fueron fechados mediante la radiocronología con  $^{210}\text{Pb}$ . Estos autores reportan valores para Ni (0.56-76.9

$\mu\text{g g}^{-1}$ ), Cr (3.0-100.0  $\mu\text{g g}^{-1}$ ) y Pb (0.22-20.2  $\mu\text{g g}^{-1}$ ), concluyendo que las concentraciones de estos metales aumento hacia la parte suroeste del área de muestreo; asimismo, determinaron que la principal fuente de metales es litogénica, siendo el sistema Grijalva-Usumacinta el que realiza el mayor aporte.

### 3.2 Nacional

A nivel nacional se han realizado diversos estudios en zonas costeras, tal es el caso de Rosales-Hoz et al. (2003), que recolectaron 4 núcleos de sedimento en el río y estuario de Coatzacoalcos, Veracruz y reportaron valores promedio de Cr (37-73  $\mu\text{g g}^{-1}$ ), Ni (12-68  $\mu\text{g g}^{-1}$ ) y Pb (21-40  $\mu\text{g g}^{-1}$ ), que fueron ligados al fuerte desarrollo industrial del área. En la laguna de Chelem, en Yucatán, Arcega-Cabrera et al. (2014) observaron concentraciones de 21.5 a 41.6  $\mu\text{g g}^{-1}$  de Cr, 7.1 a 14.3  $\mu\text{g g}^{-1}$  de Ni y 0.1 a 13.5  $\mu\text{g g}^{-1}$  de Pb en muestras de sedimentos superficiales, concluyendo que las principales fuentes de los contaminantes metálicos son las aguas residuales no tratadas, así como aportes terrígenos provenientes del interior del continente relacionadas con el uso del suelo. Por otro lado, Bojórquez-Sánchez et al. (2017), analizaron 2 núcleos fechados por  $^{210}\text{Pb}$  de la Laguna Salada, Veracruz. Los contenidos de Ni observados fueron de 27.4 a 92.9  $\mu\text{g g}^{-1}$ , para Cr de 52.5 a 189.0  $\mu\text{g g}^{-1}$  y para Pb de 8.2 a 19.7  $\mu\text{g g}^{-1}$ . En este trabajo se menciona que no existe evidencia de que haya contaminación debido a la Planta Nuclear Laguna Verde (PNLV); sin embargo, se encontró un aumento en los flujos de los metales entre 1950 y 1990, periodo en el cual se construyó la PNLV. Por otra parte, Ontiveros-Cuadras et al. (2019), recolectaron en el Estero de Urías, en Sinaloa, tres núcleos de sedimentos que fueron fechados por  $^{210}\text{Pb}$ , en los que determinaron los contenidos de Ni (12.1-93.6  $\mu\text{g g}^{-1}$ ) y Pb (15.8-48.1  $\mu\text{g g}^{-1}$ ). En general, los núcleos de sedimento mostraron que los flujos de Ni y Pb aumentaron después de 1980, hasta la fecha de muestreo (2012 A.D.). Aunque se identificaron enriquecimientos menores de Pb y moderados para Ni, se señaló que estos enriquecimientos podían relacionarse al crecimiento de los desarrollos urbanos e industriales en el área, especialmente a partir del comienzo de operaciones de la Planta termoeléctrica en 1976. Recientemente, Ontiveros-Cuadras et al. (2020), realizaron un trabajo con núcleos de sedimento del sistema costero lagunar Xola-Paramán, Jalisco. Los núcleos fueron fechados por  $^{210}\text{Pb}$  y presentaron contenidos de Ni de 4.2 a 17.7  $\mu\text{g g}^{-1}$  y de Pb entre 9.0 y 15.0  $\mu\text{g g}^{-1}$ ; ambos elementos, comenzaron a mostrar incrementos en sus

flujos entre 1930 y 1970, que coincidieron con los impactos de huracanes y cambios de uso de suelo en la región.

### 3.3 Internacional

A nivel internacional, Ahumada y Rudolph (2004) analizaron 2 núcleos de sedimento recolectados en 1996 en la Laguna de San Rafael, Chile, que presentaron concentraciones de 58.0 a 63.0  $\mu\text{g g}^{-1}$  para Cr, 21.0 a 26.9  $\mu\text{g g}^{-1}$  para Ni y 6.3 a 11.1  $\mu\text{g g}^{-1}$  para Pb, que fueron vinculadas a la litología del lugar, la cual se compone por granitos, gneiss y esquistos. Asimismo, Chen et al. (2010), realizaron un estudio con núcleos de sedimento de la laguna de Burullus, Egipto. El promedio de las concentraciones en las secciones más superficiales (profundidad de 10-15 cm hacia la superficie) mostraron valores de 88.94  $\mu\text{g g}^{-1}$  para Ni, 8.22  $\mu\text{g g}^{-1}$  para Pb, mientras que el promedio de las secciones más profundas (>10-15 cm) fue de 107.91  $\mu\text{g g}^{-1}$  para Ni, 5.78  $\mu\text{g g}^{-1}$  para Pb. A lo largo de los núcleos, se observó un aumento en las concentraciones de los metales hacia su superficie. La principal fuente de contaminación propuesta en el trabajo son las aguas residuales provenientes de las ciudades de Tanta y Kafrelsheikh, así como las actividades de las refinerías petroleras y las industrias de fertilizantes. Uluturhan et al. (2011) realizaron un estudio en la laguna de Homa, Turquía en donde reportaron concentraciones de varios metales, entre los que se encontraban Cr, Ni y Pb. La recolección de muestras de sedimentos superficiales se llevó a cabo durante 2005 y 2006, en 8 estaciones a lo largo de la laguna. Se encontraron las siguientes concentraciones: 83.9-129  $\mu\text{g g}^{-1}$  para Cr, 58.1-108  $\mu\text{g g}^{-1}$  para Ni y 2.43-17.2  $\mu\text{g g}^{-1}$  para Pb. Los datos obtenidos mostraron que los sedimentos estaban moderadamente contaminados por Ni y Cr, siendo la principal fuente de emisión los aportes de agua residuales agrícolas, industriales y domésticas transportadas por el río Gediz. Por su parte, Maanan et al. (2015), analizaron 28 muestras de sedimentos superficiales de la laguna de Nador, en Marruecos, reportando valores de 22.4 a 172.2  $\mu\text{g g}^{-1}$  para Cr, 20.2 a 95.2  $\mu\text{g g}^{-1}$  para Ni y 15.6 a 326.2  $\mu\text{g g}^{-1}$  para Pb. En el caso del contenido de Pb, los autores sugieren que proviene de las descargas de aguas residuales de zonas urbanas e industriales, mientras que las concentraciones de Cr y Ni, las relacionaron con la agricultura intensiva de la región. Por último, Mna et al. (2017) analizaron 2 núcleos recolectados en la laguna Bizerte, Tunisia, reportando las siguientes concentraciones: 155-210  $\mu\text{g g}^{-1}$  para Cr, 52-88  $\mu\text{g g}^{-1}$  para Ni y 100-190  $\mu\text{g g}^{-1}$  para Pb. En este estudio se indica, que la principal fuente de contaminación y aporte de metales en el área es la actividad minera.

## 4. Área de estudio

### 4.1 Localización

El estado de Campeche se encuentra en la parte sureste del país, en la porción suroccidental de la península de Yucatán. La capital del estado es San Francisco de Campeche. Sus límites son, al nor-noreste con el estado de Yucatán, en la parte oeste con el Golfo de México, al este con el estado de Quintana Roo y al sur con el estado de Tabasco, así como con las repúblicas de Guatemala y Belice. Tiene una extensión territorial de 57,507 km<sup>2</sup>, comprendiendo el 2.9% de la superficie total del país (SGM, 2020). Se divide en: Calakmul, Calkiní, Campeche, Candelaria, Carmen, Champotón, Dzitbalché, Escárcega, Hecelchakán, Hopelchén, Palizada, Seybaplaya y Tenabo. Campeche se encuentra contenido dentro de las coordenadas geográficas: 17°48'-20°52' de latitud norte y 89°06'-92°27' de longitud oeste (SGM, 2020; Figura 2).



*Figura 2. Localización del estado de Campeche.*

Laguna de Términos (LT) se ubica en la zona costera del estado de Campeche, entre el río San Pedro y San Pablo al occidente y el área de drenaje del Estero Sabancuy hacia el oriente. Además, se encuentra separada al norte del Golfo de México por la Isla del Carmen. La Laguna de Términos se encuentra en el extremo oriental del delta del río Usumacinta, entre los municipios de Carmen y Palizada, en las coordenadas 18°01'54" y 19°13'30" de latitud norte y 92°32'33" y 90°59'15" de longitud oeste (SEMARNAP, 1997).

## **4.2 Características generales**

La región de LT tiene un área aproximada de 705,016 ha, con dimensiones de 70 km de largo y 30 km en su parte más ancha, dando un área de 1700 km<sup>2</sup>, junto a sus sistemas fluvio-lagunares asociados (Gómez-Reyes et al., 1977). Esta laguna es la de mayor volumen en la porción mexicana del Golfo de México. Es somera con una profundidad promedio de 4 m y un fondo plano. Posee dos bocas que la conectan permanentemente con el mar: Puerto Real, ubicada en el extremo este de la isla del Carmen y El Carmen ubicada en el extremo oeste. Ambas bocas poseen un canal profundo en su lado oriental (entre 14 y 18 m). La boca de Puerto Real tiene un ancho promedio de 3.2 km y tiene aguas marinas transparentes y un notable delta interior. La boca del Carmen tiene un ancho promedio de 3.8 km, que es influenciada por la cercanía de la desembocadura del río Palizada, así que posee abundantes terrígenos finos en suspensión que provocan turbidez y forman un delta exterior (SEMARNAP, 1997; Figura 3).

La región tiene una larga historia cultural, ya que desde tiempos prehispánicos fungía como un sitio de gran actividad comercial y militar. Incluso se han llegado a encontrar vestigios tanto en la Isla del Carmen como en la parte continental. La región tuvo un gran decaimiento después de la conquista y ocasionó el abandono de la zona hasta que, a finales del siglo XVI, hubo una gran ocupación por parte de piratas que se dedicaron a explotar el palo de tinto. A partir de 1950 ha sido una de las zonas más productivas de camarón del Golfo de México. Desde mediados de los años 70 y hasta la actualidad, la Sonda de Campeche es una de las áreas de mayor importancia para la extracción de petróleo y gas en nuestro país (SEMARNAP, 1997).

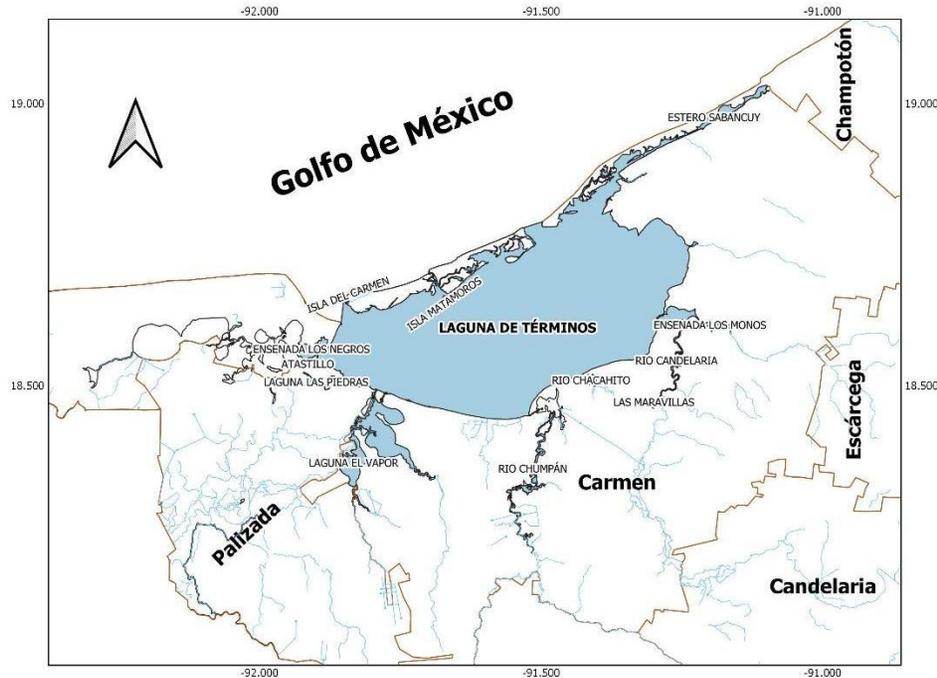


Figura 3. Localización de la Laguna de Términos, Campeche.

#### 4.3 Población

El estado de Campeche cuenta con 928,363 habitantes, que representan el 0.7% de la población total del país. El 75% de la población habita en zonas urbanas mientras que el 25% vive en zonas rurales. Los sectores económicos que más aportan al PIB estatal son la industria minera y la industria petrolera (INEGI, 2020a). En particular, el municipio de Carmen cuenta con una población de 248,845 habitantes siendo el asentamiento de la Ciudad del Carmen el más importante con 191,238 habitantes, aproximadamente el 77% de la población estatal (INEGI, 2020b).

La actividad económica más importante en la región es la extracción de petróleo y gas que representó el ~66% del total nacional de crudo en el 2019 (Alonzo, 2019). Esta actividad se concentra en la Sonda de Campeche, en el Puerto Industrial de Ciudad del Carmen y la Península de Atasta en donde se instaló la planta de Nitrógeno y la plata de rebombeo del gas, además de una serie de ductos de carga y descarga. Por otro lado, la pesca también es actividad importante, siendo las principales especies el camarón rosado, jaiba, ostión y sierra. Además, la ganadería, principalmente de bovinos es realizada en la zona junto con la agricultura temporal anual realizada en las cuencas de La Piña, El este, Chumpan y Candelaria cultivando arroz, chile jalapeño, sorgo y maíz, mientras que la

agricultura perenne se dedica a la producción de naranja, mango y limón en Sabancuy, Balchacá, Plato, Candelaria y Chumpán (Venegas, 2003).

#### 4.4 Accesos y vías de comunicación

Campeche tiene un bajo desarrollo de infraestructura. Al 31 de diciembre del 2016, el estado contaba con una red carretera de aproximadamente 4518 km (INEGI, 2017). Dentro de sus principales vías de comunicación se encuentra la carretera federal 180 que comunica Villahermosa con Ciudad del Carmen, Champotón y Campeche, hasta llegar a Mérida. La carretera federal 261, Escárcega-Champotón, en donde se incorpora a la carretera 180. Se tiene otro acceso por la carretera federal 186 que enlaza a las ciudades de Villahermosa, Escárcega y Chetumal (SE, 2004). El estado cuenta con 2 aeropuertos internacionales, uno en la ciudad de Campeche y otro en Ciudad del Carmen; asimismo cuenta con 20 aeródromos (INEGI, 2020a). En 2016, Campeche contaba con 416 km de vías ferroviarias que comunican hacia el sur los poblados de China, Villa Guadalupe, Felipe Carrillo Puerto hasta llegar a Villahermosa, Tabasco; mientras que en otro tramo el “Ferrocarril del Sureste” viaja de Campeche hacia el norte y comunica con poblados Tenabo, Calkiní, Maxcanú y Mérida (SE, 2004; Figura 4).

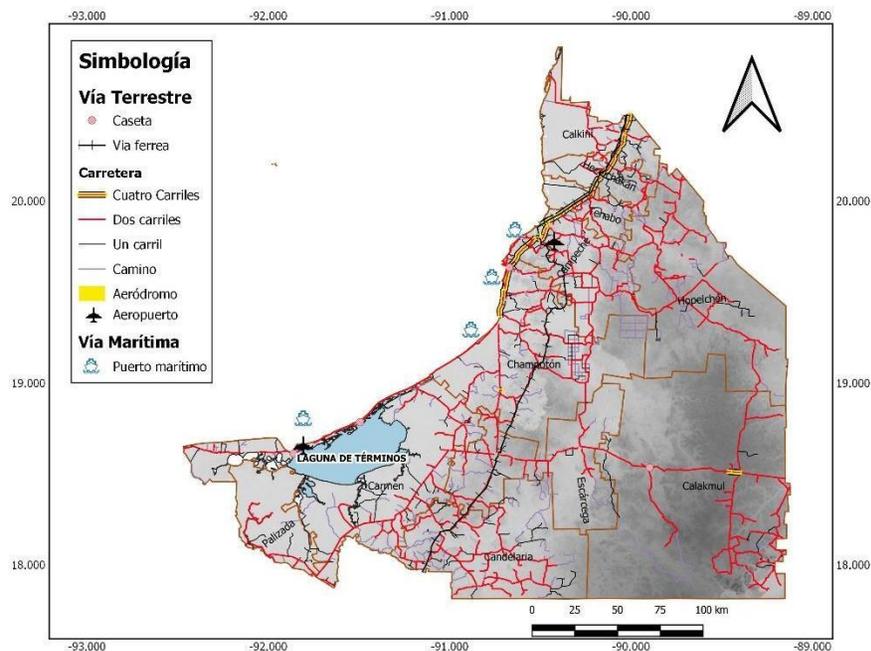


Figura 4. Vías de acceso en el estado de Campeche.

#### 4.5 Orografía

El estado de Campeche comprende dos provincias fisiográficas. En primer lugar, está la Península de Yucatán, que en el territorio de Campeche se encuentran las subprovincias Carso Yucateco al norte y Carso y Lomeríos de Campeche al este, abarcando el 5.9% y el 74.2% del territorio estatal, respectivamente. En segundo lugar, está la Llanura Costera del Golfo Sur, la cual tiene una subprovincia dentro del territorio del estado. Esta subprovincia es la de Llanuras y Pantanos Tabasqueños, que representa el 19.8% del territorio estatal y que a su vez se divide en llanura (97.2%), lomeríos (1.5%) y playa o barra (1.2%), incluyendo a los municipios de Candelaria, Carmen, Champoton, Escarcega y Palizada (INEGI, 2017).

Campeche tiene una elevación máxima de 340 m sobre el nivel del mar (msnm), además de contar con cenotes. Sus principales elevaciones son Cerro Champerico (390 m), Cerro los Chinos (370 m), Cerro el Ramonal (340 m), Cerro las Águilas (320 m), Cerro el Doce (250 m), Cerro Chumul (230 m) y Cerro el Gavilán (210 m). El estado tiene una línea de costa con una longitud de 425 km (INEGI, 2017).

La región de LT se encuentra en la provincia fisiográfica Llanura Costera del Golfo Sur, que es una planicie de origen sedimentario generado por la Regresión del Océano Atlántico durante el Cenozoico (INEGI, 2016a). Abundan los suelos profundos formado por el material que es transportado y depositado por los ríos, ya que en esta zona desembocan algunos de los más caudalosos del país, como son el Grijalva y el Usumacinta. Adicionalmente, al oriente de Tabasco se tienen grandes zonas inundables que propician la formación de pantanos permanentes (INECC, 2007). Su topografía es suave debido a lo avanzado de su madurez, que se observa en el sistema fluvial de los ríos Usumacinta y Grijalva. En la región, gran parte de la superficie se encuentra constituida por pantanos, lagunas y lagos permanentes. Hacia la parte este, la topografía es ligeramente ondulada y está cubierta por calizas del Mioceno y Eoceno (Álvarez, 1958).

En cuanto a la subprovincia, pertenece a Llanuras y Pantanos Tabasqueños, que se caracteriza por la presencia de pantanos, lagos de régimen permanente y áreas inundables que alternan con lomeríos de poca elevación y depósitos aluviales antiguos, que se interpretan como superficies fósiles depositadas en el Cenozoico. Las modificaciones en la superficie se deben a que durante el Pleistoceno hubo oscilaciones en el nivel del mar que influyeron junto con la erosión fluvial (INEGI, 2016a; Figura 5).

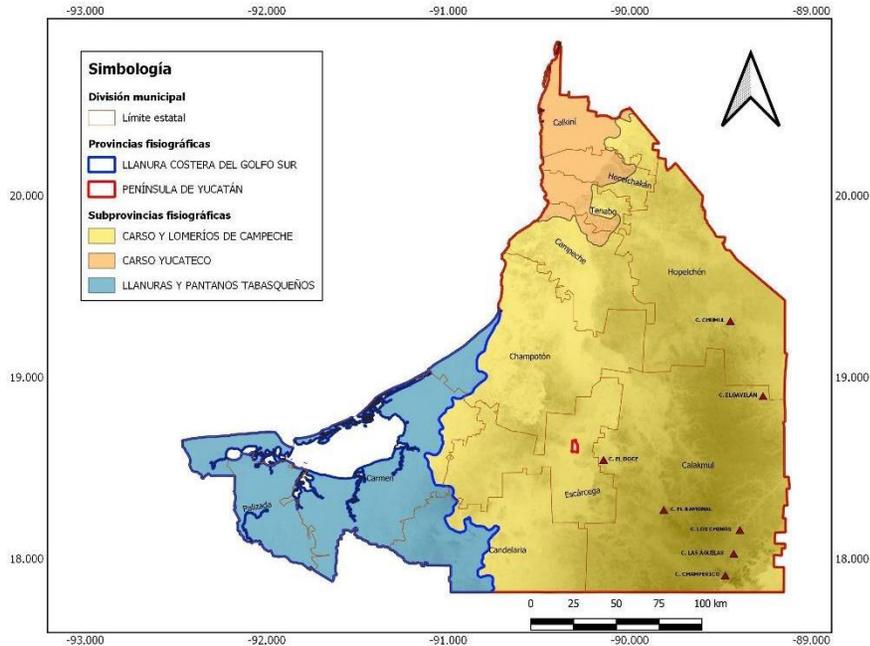


Figura 5. Fisiografía y orografía del estado de Campeche.

#### 4.6 Hidrología

El estado cuenta con cuatro regiones hidrológicas que se componen de cuencas que a su vez están integradas por subcuencas. En primer lugar, se tiene la región Yucatán Este (Quintana Roo), que se compone de las cuencas Bahía de Chetumal y otras, así como de las cuencas cerradas. En segundo lugar, está la región Yucatán Norte (Yucatán), que está conformada por la cuenca Yucatán. En tercer lugar, está la región Yucatán Oeste que está constituida por las cuencas Río Grijalva-Villahermosa, las cuencas cerradas, y la cuenca del Río Champotón. Finalmente, la región Grijalva-Usumacinta está formada por las cuencas Río Usumacinta y la cuenca de LT; esta última cuenca representa el 34.6% de la superficie estatal y a su vez se divide en las subcuencas Laguna de Términos, Laguna de Pom y Atasta, Laguna del Este, Río Chumpán, Río Candelaria, Varias, Río Caribe y Río Mamantel (INEGI, 2017).

Las principales corrientes de agua en Campeche son: Champotón, Concepción, San Pedro y San Pablo, El Tigre, Usumacinta, Candelaria, Palizada, Salsipuedes, Mamantel, Chivojá, Caribe y Desempeño; mientras que las lagunas son: LT, Atasta, Pom, de Carlos, Noh-Há, Panlao, Silvituc, Panlao, Chama-Há, X-Toc, Ik y Chuncopó; también, se encuentran los esteros Sabancuy y las Bocas, así como el lago el Teniente (INEGI, 2020a; Figura 6).

LT recibe grandes volúmenes de flujos de agua dulce de una cuenca de 48,700 km<sup>2</sup> que drena partes tanto de la península de Yucatán, las tierras bajas de Tabasco y las tierras altas de Chiapas y Guatemala. Estos flujos varían según la estación (Bach et al., 2005). En la región desemboca gran parte de la red hidrológica de la zona costera del Golfo de México, constituida por los ríos Mezcalapa, Grijalva y Usumacinta. Esta red hidrológica conforma un complejo fluvio-lagunar estuarino que contiene a los ríos Palizada, Chumpán y Candelaria, también a las lagunas litorales Pom-Atasta-Puerto Rico, San Carlos, Del Corte, además del sistema Palizada-Del Este-San Francisco-El Vapor, Balchacah (Sitio Viejo), Chacahito y la Laguna de Panlao. Los sistemas principales asociados a LT son:

Sistema Pom-Atasta: Se origina a partir del aporte de sedimentos terrígenos y los movimientos laterales de los ríos Usumacinta y el río San Pedro y San Pablo, además de la formación de la barra litoral constituida por varias series de cordones de playa.

Sistema Palizada-Del Este: Está formado por la parte terminal del Río Palizada, el río Usumacinta, tres ríos secundarios (Las Piñas, Marentes y las Cruces) y las tres lagunas Del vapor, Del Este y San Francisco. Aporta el 70% del aporte de agua dulce a LT.

Sistema Chumpán-Balchacah: Este sistema abarca la parte terminal del Río Chumpán y la laguna de Blachacah (Sitio Viejo).

Sistema Candelaria- Panlao: Es la parte final de los ríos Candelaria y Mamantel, así como la Laguna Panlao.

En total 23 cuencas hidrográficas del tipo exorreico desembocan en LT; sin embargo, las más extensas y de mayor importancia son Candelaria, Chumpán y Mamantel. La red hidrográfica tiene tanto corrientes perennes, así como intermitentes, el patrón de drenaje es dendrítico y hacia las desembocaduras meándrico o anastomosado (INEGI, 2016). Al oeste y al sur el río Palizada, un tributario del río Usumacinta, drena un área de suelo fluvial con mucha precipitación. Es este mismo río quien descarga aproximadamente el 75% del total de agua dulce fluvial que llega a la laguna (Bach et al., 2005).

En cuanto a la hidrodinámica los principales procesos marino-costeros asociados son el transporte y movimiento de las corrientes litorales, el flujo al interior de la laguna, el aporte de las aguas fluviales, la descarga estuarina de LT, los procesos deltaicos en las bocas estuarinas, así como el intercambio físico, químico y biológico entre LT y las aguas costeras (SEMARNAP, 1997). Los principales factores que dominan la dinámica en la laguna son los vientos y las mareas. Debido a que predominan los vientos del sureste, así como la corriente

litoral y la descarga fluvial dominante ocasiona que el agua proveniente del Golfo entre a LT por la Boca de Puerto Real, con un flujo neto de  $13,500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  en dirección este-oeste (Venegas ,2003) y salga por la boca del Carmen. Durante el invierno, los vientos del norte producen un efecto de retención del agua fluvial y un ingreso de agua marina. Ya que la laguna no cuenta con gran profundidad, es de gran importancia la influencia de viento en las corrientes en su interior, llegando a generar una mezcla vertical que provoca la resuspensión de sedimentos y nutrientes que pueden llegar a ser transportados a la plataforma continental, favoreciendo la productividad (SEMARNAP, 1997). En cuanto a las mareas, en LT se presentan de tipo mixto diurno (diurnas y semidiurnas). El rango entre la pleamar y la bajamar medias en la isla del Carmen es de 0.43 m. Por otro lado, la laguna tiene un frente permanente de surgencias, que en conjunto con el aporte de agua dulce y la turbulencia genera en la zona un gran enriquecimiento en nutrientes, lo que la vuelve un área altamente productiva (Ramsar, 2022). A partir de las características hidrológicas se puede dividir a LT en dos áreas. La primera, se encuentra en la zona occidental y recibe la mayor parte del desagüe de los ríos; por consiguiente, aquí se tiene gran cantidad de sedimentos lodosos, es una zona productiva, bien mezclada y de baja salinidad. Sus aguas turbias no favorecen el crecimiento de pastos marinos. La segunda área engloba la parte central y oriental, en donde se tienen bajas profundidades y mayores cantidades de sedimentos calcáreos y lechos marinos (Bach et al., 2005).

Los servicios ambientales que genera este sistema hidrológico para la región, son la fuente de producción primaria (260 ton/año para pastos marinos y 46.5 ton/ha/año para manglares), mantener la línea de costa y la cantidad de agua. El humedal regula los procesos deltaicos del sistema de ríos Grijalva-Usumacinta (Venegas, 2003).



deltaicos asociados, los pantanos o humedales costeros y los bosques de manglar circundantes. Los sistemas de pantanos y humedales junto con los de Tabasco forman la unidad ecológica costera más importante de Mesoamérica por su productividad natural y biodiversidad. El área es de gran importancia ecológica, ya que cuenta con distintas asociaciones vegetales terrestres y acuáticas, como la vegetación de las dunas costeras, mangles, vegetación de pantano como tular, carrizal y popal; selva baja inundable, palmar inundable, matorral espinoso inundable, matorral inerme inundable, vegetación riparia, selva alta-mediana; además de la vegetación de las fanerógamas permanentes inundadas como lo son los pastos submarinos (SEMARNAP, 1997).

En la región de LT la vegetación consiste principalmente en selva subperennifolia y en menor abundancia selva perennifolia, manglares, vegetación subacuática, de sabana y bosque de encino (INEGI, 2016a). En cuanto a su diversidad faunística, se tiene el reporte de al menos 1468 especies tanto terrestres como acuáticas. De estas, 30 especies son anfibios, reptiles, aves y mamíferos considerados endémicos para el país. De todas estas especies, 132 tienen una importancia comercial. También se conoce que al menos 89 especies se encuentran con diferentes grados de riesgo o amenaza (SEMARNAP, 1997).

El área forma un conjunto de hábitats críticos tanto para especies pesqueras de importancia comercial entre las que se encuentran el camarón, róbalo, corvina, pargo y jaiba. Asimismo, habitan especies amenazadas como el mangle, la cigüeña jabirú, el halcón peregrino, el cocodrilo, el manatí, el mapache, el ocelote, el jaguar, las tortugas marinas, entre otras. Los ecosistemas dentro de LT son importantes ya que son áreas de refugio, anidación y crianza para distintas especies migratorias (SEMARNAP, 1997). Los hábitats críticos dentro de la zona son los pastos marinos, las bocas estuarinas y el manglar, con una superficie aproximada de 127,000 ha (Ramsar, 2022). El estado de Campeche cuenta con cuatro sitios Ramsar, los cuales son el Área de protección de flora y fauna Laguna de Términos, la playa Tortuguera Chenkán, la Reserva de la Biosfera Los Petenes y la Reserva de la Biosfera Ría Celestún (CONANP, 2021).

#### **4.8 Clima**

Campeche tiene un clima predominante cálido subhúmedo (92% del territorio), mientras que hacia la este, el clima cálido húmedo representa el 7.7% de la superficie y al norte el 0.05% tiene clima semiseco (INEGI, 2020; Figura 7). La temperatura media anual es de 24 a 26°C, con una máxima de 30°C y una mínima de 18°C. Las lluvias son de abundantes a muy abundantes durante el verano. Campeche tiene una precipitación anual

que va entre los 1200 y 2000 mm, mientras que en la región del norte es de  $\sim 800$  mm anuales (INEGI, 2020a).

La región de LT presenta un clima cálido con variaciones en tipo, subtipo y régimen de lluvias. Según la clasificación de Köppen modificada por García (1964), en el área existen tres tipos de climas: 1) Clima subhúmedo intermedio con lluvias en verano en la Isla Aguada, frente a la Boca del Puerto Real; 2) Clima cálido subhúmedo con mayor humedad en la zona que rodea a LT, incluyendo la Isla del Cármen y 3) Clima cálido húmedo con abundantes lluvias en verano en la zona de Palizada, Pom-Atasta hasta el río San Pedro. Existen dos sistemas de vientos dominantes; el primero se manifiesta de febrero a octubre y se origina al noroeste, con una velocidad promedio de  $8 \text{ m s}^{-1}$ . Estos se forman por el desplazamiento de las masas de aire frío seco que vienen de la parte continental de Estados Unidos y Canadá, que interactúan con las masas de aire marítimo tropical del Golfo de México (SEMARNAP, 1997). Durante el resto del año hay un sistema de brisa marina con vientos, principalmente del noreste y sureste con una velocidad de entre  $4$  y  $6 \text{ m s}^{-1}$  (Venegas, 2003).

LT presenta un patrón estacional de temperatura. En la época de secas se tienen temperaturas máximas de  $\sim 35^{\circ}\text{C}$ , que ocurren de febrero a mayo, mientras que en la época de nortes se tienen temperaturas mínimas de  $\sim 18^{\circ}\text{C}$  (noviembre-febrero); es también en esta época, donde se presentan lluvias ocasionales. Finalmente, durante junio a octubre se tiene la época de lluvias. Los meses en los cuales se presentan las lluvias más intensas son entre septiembre y noviembre, que coincide con la temporada de ciclones. Por el contrario, entre marzo y mayo se observan las precipitaciones mínimas (SEMARNAP, 1997).

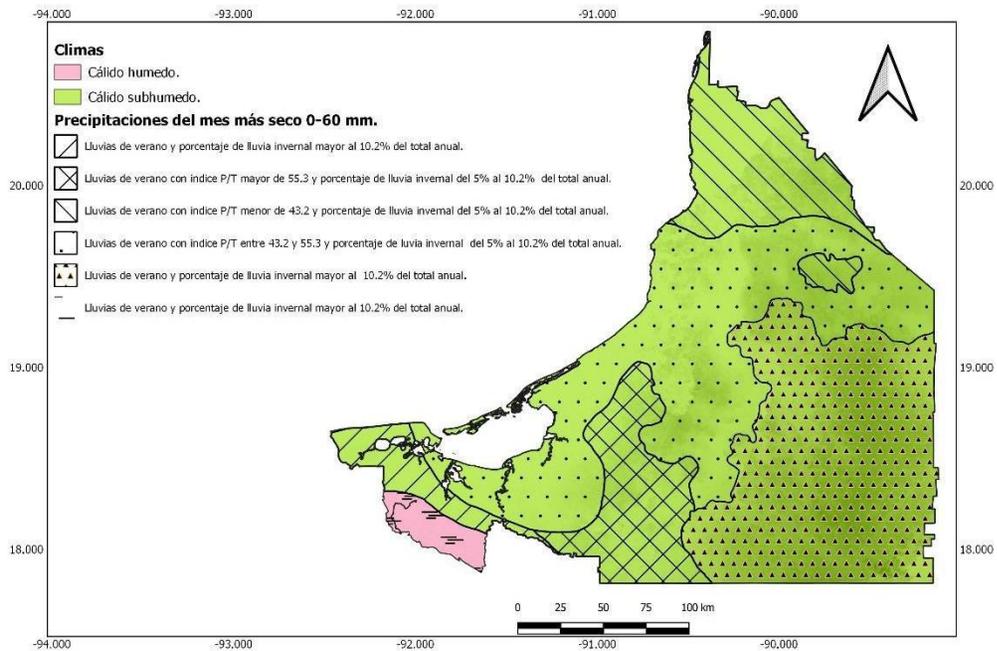


Figura 7. Climas en el estado de Campeche.

#### 4.9 Geología regional

La historia geológica de la península de Yucatán se remonta a la apertura del golfo en el Triásico Superior hasta el Jurásico medio, durante la ruptura del supercontinente Pangea (SGM, 2004). En esta época la sedimentación continental fue controlada por procesos tectónicos distensivos. A lo largo de la etapa temprana del rifting se tuvieron lentos hundimientos y ensanchamiento de los sistemas de grabens, que fueron inundados con las aguas del Pacífico, invadiendo la parte oriental de lo que en la actualidad es el Golfo de México. Esto formó extensos cuerpos salinos con una circulación restringida que junto con el clima desértico propició la formación de grandes volúmenes de evaporitas en el centro del Golfo de México. Durante el Kimeridgiano, el bloque Yucatán se desplazó hacia el sureste mediante dos sistemas de fallas transformantes, el sistema occidental llamado falla transformante Tamaulipas-Golden link-Chiapas o falla Tamaulipas-Oaxaca, y el sistema de falla transformante occidental, que separaban las plataformas de Yucatán y Florida. Durante el Jurásico Tardío se tuvo un periodo de estabilidad tectónica en donde la subsidencia se dio de manera lenta, asociada al desplazamiento divergente de la placa Norteamericana de la de Laurasia y Gondwana. Estas condiciones favorecieron al depósito de carbonatos y lodos calcáreos intercalados (Padilla y Sánchez, 2007). En el Cretácico inferior se depositaron calizas en grandes paquetes. En el Cretácico medio y superior, una transgresión marina favoreció el depósito de grandes espesores de carbonatos y rocas

evaporíticas (López, 1973). A finales del Maastrichtiano inferior ocurrió la orogenia Laramide ocasionando el levantamiento y formación de la Sierra Madre Oriental que a su vez originó una serie de cuencas, donde ahora se ubica Veracruz, Tabasco y Campeche (Amos, 1991), que poco a poco fueron rellenadas por material clástico proveniente de la Sierra Madre Oriental. Fue también durante el límite entre el Cretácico y el Paleógeno que ocurrió el impacto de un cuerpo extraterrestre en la costa norte de Yucatán, dejando una gran brecha de carbonatos en el sur del Golfo de México, siendo de gran importancia económica, ya que representa la roca almacén de grandes campos petroleros como es la Sonda de Campeche (Grajales-Nishimura et al., 2000). Durante el Paleoceno y Eoceno en la plataforma de Yucatán se depositaron carbonatos y en menor cantidad evaporitas, con espesores entre 100-2000 m. A partir del cenozoico y hasta la actualidad, las oscilaciones en el nivel del mar han depositado facies sedimentarias que varían entre plataforma somera y evaporíticas restringidas. En el Pleistoceno y el Holoceno el nivel del mar aumentó 5 m arriba del nivel actual, generando depósitos caracterizados por zonas de pantanos y de bioclastos derivados de las unidades más antiguas. En cuanto a la deformación frágil, se tiene la falla normal Campeche Hecelchakán, que afectan las formaciones de Chichén Itzá y Carrillo Puerto, expuesta en una longitud de 48 km con un rumbo NW 55° SW y echado de 75° al NW, presentando una brecha clástica y estrías (SGM, 2004).

#### **4.10 Geología local**

La LT se ubica en una depresión marginal deltaica remanente de un cuerpo lagunar más amplio (CGASI, 2011). Se localiza en la transición entre el flanco oriental de la llanura aluvial del Delta del río Usumacinta y de sus afluentes los ríos San Pedro-San Pablo y Palizada, y la provincia biógena carbonatada de la península de Yucatán (CGASI, 2011). De acuerdo a Lankford (1977) LT se clasifica como Tipo II A, ya que es una laguna costera asociada a sistemas fluviales o deltaicos, producido por sedimentación irregular terrígena con una depresión interdeltaica, que presenta un hundimiento superficial por efecto de compactación. Por lo general, este tipo de lagunas tienen barreras que se forman rápidamente y que encierran depresiones poco profundas. Además, la escorrentía es directa o a través de algunas entradas. Los cambios en la batimetría y forma ocurren rápidamente. La energía en general es baja dentro de la laguna, excepto en canales y ensenadas. En la región de LT afloran aluviones del cuaternario de origen terrígeno, ubicados en casi todo el sistema lagunar, además de material de calizas biogénicas ubicado principalmente frente al litoral (CGASI, 2011). De esta manera se tienen las siguientes litologías en el área (INEGI, 2016a):

Caliza-yeso Tpal(cz): Secuencia depositada durante el Paleoceno y conocida como formación Icaiché. Se distribuye en el extremo sur oriental del área estudiada. Presenta textura en microcristalina a megacristalina, con silicificación secundaria, de color blanco. Además, se pueden encontrar en la formación horizontes de yeso y margas. Los espesores pueden llegar a varios metros.

Caliza Te (cz): La formación Chichén Itzá tiene unidad del océano y está constituida por calizas microcristalinas con horizontes de travertino. Es de color blanco a gris crema con alternancias de marga. Se localiza en la parte oriental.

Arenisca Tm(ar): Es una roca con edad del Mioceno poco consolidada. Proviene de materiales de depósito de talud poco clasificados, originados por la orogenia Chiapaneca y se ubica en las zonas más elevadas.

Caliza Q(cz): Con edad del Cuaternario, corresponde a la formación Carrillo Puerto. Es una caliza de textura microcristalina con fragmentos de fósiles. Se ubica en la parte norte.

Conglomerado Q(cg): Con edad del Cuaternario, este conglomerado está constituido por depósitos de materiales gruesos compuestos de rocas preexistentes acumuladas por corrientes hídricas de alta energía. Se ubica hacia la parte sur.

Caliche Q(ch): Cuaternario. Se forman mediante la combinación de carbonatos con arcillas, limos, arenas y grabas, generando placas gruesas de consistencia dura en la parte norte y centro de la región.

Suelos palustres Q(pa): Su edad es del Cuaternario. Se localiza en las lagunas y pantanos. Constituido por sedimentos con mucha arcillas y materia orgánica en descomposición.

Suelos litorales Q (li): Con edad del Cuaternario. Son depósitos arenosos que se formaron por el arrastre del oleaje o del viento. Se posicionan de manera paralela a la línea de costa y forman barras. Están ubicados en el extremo norte en la zona que separa a LT del Golfo de México.

Suelos lacustres Q (la): Su edad es el Cuaternario. Está constituido por material de textura fina, rica en materia orgánica, depositado en zonas inundables aledañas a lagos y lagunas.

Suelos aluviales Q (al): Con edad del Cuaternario. Se formó a partir del transporte a zonas bajas de material terrígeno sin consolidar, provenientes de rocas preexistentes que afloran en las partes altas de las cuencas. Cubre grandes áreas de la planicie.

Por otro lado, la Isla del Carmen tiene su origen durante el Pleistoceno, donde la barra se formó a partir de varias islas cuyas áreas intermedias fueron azolvándose hasta quedar unidas. Tiene ondulaciones de baja amplitud que antiguamente eran cerros de playa formados por la acumulación de sedimentos transportados por tormentas, corrientes litorales y el rompimiento de olas en la playa. La isla está compuesta de sedimentos de litoral entre los que se encuentran material calcáreo, arenas finas y gruesas, así como conchas de moluscos (CGASI, 2011). Hacia la zona de Palizada la geología se conforma de sedimentos Cuaternarios del Pleistoceno y Holoceno integrado por conglomerado polimíctico, arenisca (Qpt(?) Cgp-Ar), correspondiente a la formación Tierra Colorada de la cuenca Macuspana del Pleistoceno; también, se tienen depósitos palustres, lacustres y de aluvión del Holoceno (Piñeiro, 2007; Figura 8).

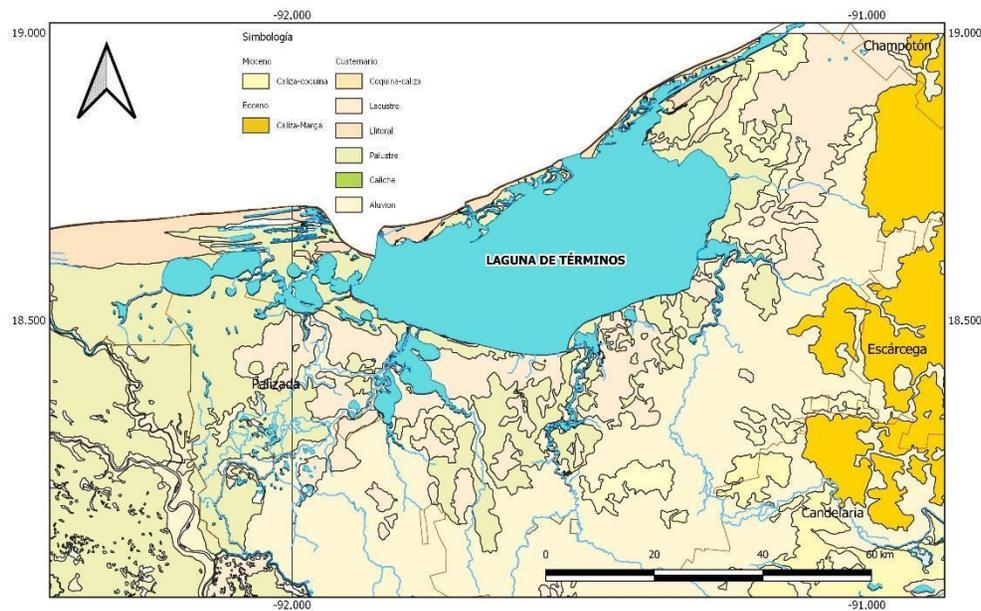


Figura 8. Geología en la zona de Laguna de Términos, Campeche.

#### 4.11 Amenazas

La región se encuentra expuesta a distintos factores que amenazan el equilibrio ecológico y que han ido aumentando con el paso del tiempo. Los principales factores son: la urbanización, la industrialización, el cambio de uso de suelo, la inadecuada promoción de proyectos, la agricultura, el uso de pesticidas, la ganadería, la sobreexplotación de recursos, la alteración del régimen hidrológico de la cuenca Grijalva-Usumacinta, así como la extracción de hidrocarburos, la actividad pesquera legal e ilegal y el azolve de las bocas de los ríos. Esto ha ido ocasionando problemas de sedimentación, contaminación,

deforestación y reducción de recursos (Venegas, 2003; Reyes-Gómez y Vázquez-Lule, 2009).

El periodo de desarrollo del petróleo en la región comenzó a inicios de los años 70s, lo cual ocasionó un gran crecimiento de la Ciudad del Carmen. A partir de entonces, se han realizado grandes obras entre las que se encuentran la Estación Recompresora de Atasta, el pozo de gas de Xicalango y la planta de nitrógenos Cantarell, al igual que la red de caminos, ductos y canales que atraviesan los humedales, que los han ido modificando y en algunos casos los han llegado a secar. Una de las más grandes afectaciones que se han generado debido a la actividad petrolera fue lo relacionado con la red de canales El Manglar, El Gallego y el Atasta-Ciudad Pemex, que ocasionó un cambio en el flujo laminar, conectando el Río San Pedro y San Pablo con la llanura fluvial, acelerando la deposición de sedimentos (EPOMEX, 1993). Además, se tiene el registro de los derrames de hidrocarburos en la zona, en febrero de 1976, el 3 de junio de 1979 (Pozo Ixtocl), el 17 de abril de 2002 (plataforma Satélite Uech) y el 23 de octubre de 2007 (Pozo Kab-101). Aunado a esto, la actividad de la recompresora también genera un gran impacto ambiental, ya que es una fuente importante de  $SO_2$  para la región. A pesar de que la Ciudad del Carmen cuenta con ocho plantas de tratamiento de agua residual que operan por el proceso de lodos activados, esto no ha resuelto el problema del agua, ya que una importante fracción de la contaminación en el agua de la región proviene de las aguas residuales, el alcantarillado doméstico y la escorrentía agrícola. Finalmente, se ha detectado que el desarrollo de infraestructuras, como es la modificación de la línea de costa en la península de Atasta, ha interrumpido el transporte de sedimentos a las playas y la obstrucción de los flujos naturales de agua (Venegas, 2003).



Para el muestreo se utilizaron tubos de plexiglás con un diámetro interno de 8.6 cm. Los datos de cada uno de los núcleos se muestran en la siguiente tabla (Tabla 1).

*Tabla 1 Coordenadas de núcleos de sedimento recolectados en Laguna de Términos, Campeche.*

Núcleo	Coordenadas	Longitud (cm)	Profundidad de la columna de agua (m)
LT01	18°31.56 N; 91°44.54 O	28	3.0
LT02	18°34.31 N; 91°43.94 O	23	3.2
LT03	18°37.08 N; 91°20.30 O	29	3.0

## 5.2 Trabajo de laboratorio

Los núcleos fueron trasladados al LGIG, donde se realizó el submuestreo, que consistió en su seccionamiento en intervalos de 1 cm de espesor. Se obtuvieron 16 muestras para el núcleo LT01, 13 muestras en LT02 y 16 muestras en LT03. Después las muestras se congelaron, liofilizaron, se molieron usando morteros de porcelana, a excepción de las alícuotas que se utilizarían para los análisis granulométricos y finalmente se almacenaron en bolsas de polietileno, en donde se indicaba el nombre del núcleo, así como la profundidad y el peso en gramos de la muestra (Ontiveros-Cuadras et al., 2021).

### 5.2.1 Análisis granulométricos

La distribución granulométrica (arena: > 63.0  $\mu\text{m}$ ; limo: 3.9–63.0  $\mu\text{m}$ ; arcilla: < 3.9  $\mu\text{m}$ ) se determinó por difracción láser en un equipo Malvern Mastersize 2000, una vez que se realizó la digestión de la materia orgánica con  $\text{H}_2\text{O}_2$  (30%), en las alícuotas de sedimento seco sin moler (Ontiveros-Cuadras et al., 2021).

### 5.2.2 Fechado con $^{210}\text{Pb}$

La actividad total de  $^{210}\text{Pb}$  ( $^{210}\text{Pb}_{\text{total}}$ ) y de  $^{226}\text{Ra}$  se determinaron por espectrometría de rayos gamma en un equipo ORTEC GWL-120-15-S. Las actividades de  $^{226}\text{Ra}$  (16.9-25.0  $\text{Bq kg}^{-1}$ ) se utilizaron para estimar los valores de  $^{210}\text{Pb}$  en exceso ( $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ ), que es la diferencia entre la actividad de  $^{210}\text{Pb}_{\text{total}}$  y la de  $^{226}\text{Ra}$  en cada sección. El fechado de los núcleos, además del cálculo de las tasas de acumulación sedimentaria (TAS,  $\text{cm año}^{-1}$ ) y másica (TAM,  $\text{g cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$ ) se realizó con el modelo de flujo constante (CF, por sus siglas en inglés; Robbins, 1978). La hipótesis del modelo CF menciona que el flujo de  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  hacia la superficie de

sedimento es constante e independiente de las variaciones en el flujo de partículas en hundimiento (Sánchez-Cabeza y Ruiz-Fernández, 2012), es decir:

$$f = C(i, t = 0) r(i)$$

En donde:  $r(i)$  es la tasa de acumulación másica de la capa (i) ( $\text{kg m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ ) y  $C(i, t=0)$  es la concentración de  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  en la capa (i) en el momento de su formación ( $\text{Bq kg}^{-1}$ ). De esta forma tenemos que la concentración inicial y la tasa de acumulación másica pueden ser variables, pero deben ser inversamente proporcionales.

### **5.2.3 Análisis químico**

Las muestras de sedimento fueron trasladadas al Laboratorio de Química Acuática del ICML en Ciudad Universitaria, donde fueron secadas en un horno de convección por gravedad H-62 a  $60^\circ\text{C}$  durante un día. Una vez pasado ese tiempo, se pesaron para determinar su masa seca. Después, las muestras se colocaron en bolsas de plástico y se almacenaron en el desecador Scienceware.

#### **5.2.3.1 Contenido de materia orgánica y carbonatos**

Para determinar los contenidos (%) de materia orgánica (MO) y carbonatos en las muestras de sedimento, se utilizó el método de pérdida por ignición (PPI) (Dean, 1974). A continuación, se mencionan los materiales utilizados en ambas determinaciones.

- Crisoles de porcelana
- Cucharas para pesar
- Plumón indeleble
- Bolsa de celofán para colocar la muestra calcinada

#### Contenido de materia orgánica

Se determina el peso de los crisoles de porcelana limpios; después se meten a un horno de gravedad Blue M (modelo: OV-18<sup>a</sup>; Figura 3), durante un día a  $120^\circ\text{C}$  para eliminar la humedad. Una vez que los crisoles se encuentran a peso constante, se pesa 1.5 g de muestra seca y molida en una balanza Sartorius modelo AX224 y se deposita cada muestra en un crisol distinto. Se colocan los crisoles en la mufla Thermolyne modelo Furnace 1500 y se calcinan a  $550^\circ\text{C}$  durante 4 horas. Se apaga la mufla, se dejan enfriar y pasan al desecador, posteriormente se pesan. El contenido (%) de MO se obtiene con la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Materia orgánica perdida} = \frac{(C_{\text{constante}} + \text{Muestra}_{\text{seca}}) - C_{550}}{(C_{\text{constante}} + \text{Muestra}_{\text{seca}})} \times 100$$

$C_{\text{constante}}$  = Peso crisol a peso constante (g)

$\text{Muestra}_{\text{seca}}$  = Peso muestra molida y seca (g) ( )

$C_{550}$  = Peso crisol con muestra luego de 4 horas en la mufla a 550°C (g)

Contenido de carbonatos

Se pesan los crisoles con la muestra seca después de la combustión de la MO a 550°C. Los crisoles se calcinan en la mufla a 950°C durante 4 horas; después se apaga la mufla y se deja enfriar. Los crisoles fríos se pasan a un desecador y finalmente se pesan. La muestra restante se guarda en bolsas plásticas, en un desecador. El contenido de carbonatos se calcula con la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Carbonatos perdidos} = \frac{C_{550} - C_{950}}{(C_{\text{constante}} + \text{Muestra}_{\text{seca}})} \times 100$$

$C_{\text{constante}}$  = Peso crisol a peso constante (g)

$\text{Muestra}_{\text{seca}}$  = Peso muestra molida y seca (g)

$C_{550}$  = Peso crisol con muestra luego de 4 horas en la mufla a 550°C (g)

$C_{950}$  = Peso crisol con muestra luego de 4 horas en la mufla a 950°C (g)

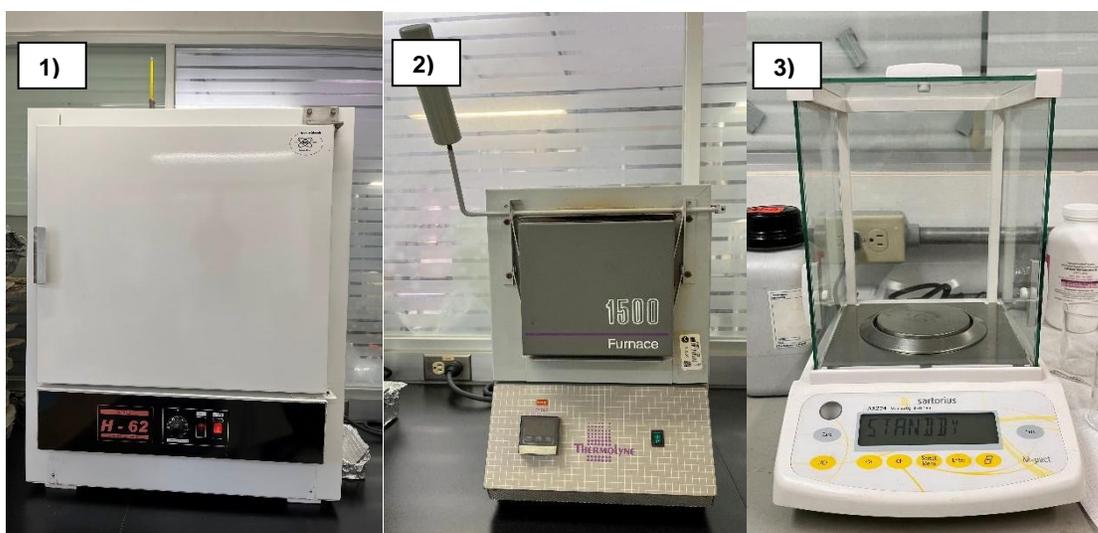


Figura 10. 1)Balanza Sartorius, 2)Mufla Thermolyne y 3)Horno de gravedad Blue M.

### 5.2.3.2 Análisis de elementos mayores

En las determinaciones se utilizó la técnica de fluorescencia de rayos X (XRF), con el objetivo de evaluar la concentración (%) de los elementos mayores  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y  $\text{MnO}$ . Enseguida se enlistan los materiales y gases empleados para preparar la pastilla fundida que posteriormente se analiza en el Espectrofotómetro de Rayos X.

- Crisoles de oro platino
- Platos de oro platino
- Cucharas para pesar
- Plumón indeleble
- Bolsas de plástico
- Etiquetas
- Tetraborato de litio ( $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ) Chemplex industries, Inc.
- Oxígeno a una presión de 0.3 bar
- Propano a una presión de 0.5 bar
- Aire a una presión de 4.5 bar

Así pues, se pesaron 0.4 g de muestra y 5.0 g de tetraborato de Litio, los cuales se colocan dentro de un crisol de oro platino y se mezclan. El crisol se coloca en la perladora de fusión Fluxana Vulcan (modelo 2MA-264; Figura 4), en donde se llevará a cabo el proceso de fusión de la muestra y el fundente. El contenido es vaciado en los moldes de oro platino que le darán las dimensiones correctas a las perlas, para posteriormente ser leídas en el Espectrofotómetro de Rayos X Bruker (Modelo: S2 Ranger) y así obtener la concentración (%) de los elementos mayores en las muestras. Las perlas de fusión se dejan enfriar, posteriormente se etiquetan, señalando el número de muestra, fecha y nombre del analista. El espectrómetro de fluorescencia de rayos X se calibra, realizando la lectura de una pastilla de cobre y el estándar BAXS-S2. Previo a la determinación del contenido de elementos mayores, se introducen los datos de cada una de las pastillas, como es el nombre de la muestra, porcentaje de contenido perdido por ignición (PPI), peso de muestra calcinada y peso de tetraborato de litio. El análisis por XRF nos reporta la concentración de Mn como  $\% \text{Mn}_3\text{O}_4$ , por lo cual se multiplicó el resultado por el factor 0.93 para dar la concentración cómo  $\% \text{MnO}$ .

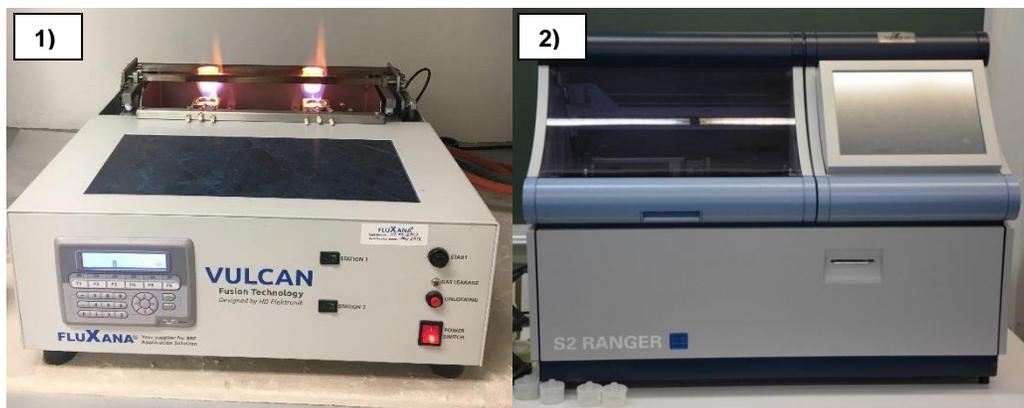


Figura 11. 1)Perladora de fusión Vulcan y 2)Espectrofotómetro de rayos X Bruker.

La evaluación de la exactitud se obtuvo a partir del análisis de los materiales certificados MESS-3, QC\_GEOMAJ-03 y QC\_GEOMAJ-01, utilizando el porcentaje de recuperación de cada uno de ellos (Tabla 2). Por otro lado, la precisión se obtuvo a partir de los resultados de nueve réplicas de una muestra por cada núcleo de sedimento. Para obtener la precisión se calculó el promedio, desviación estándar y el coeficiente de variación de cada una de las series de réplicas (Tabla 3).

Tabla 2. Porcentaje de recuperación de las concentraciones de elementos mayores en materiales certificados.

	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	TiO <sub>2</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	MnO(%)
MESS-3	93.71	95.10	93.81	95.35	79.17
QC_GEOMAJ-03	95.49	95.00	93.88	97.57	92.39
QC_GEOMAJ-01	110.52	107.20	110.53	105.99	87.78

Tabla 3. Duplicados de las muestras de sedimento para evaluar la precisión.

Muestra		Elementos mayores				
		SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO
13	Promedio	41.87	11.38	0.52	4.50	0.06
	Desv. Est.	0.49	0.17	0.01	0.05	0.001
	C.V.	1.18	1.47	2.57	1.05	1.71
23	Promedio	30.41	8.22	0.39	3.60	0.06
	Desv. Est.	0.44	0.14	0.02	0.09	0.003
	C.V.	1.45	1.69	4.50	2.39	5.32
37	Promedio	31.31	8.47	0.41	3.83	0.06
	Desv. Est.	0.36	0.09	0.02	0.06	0.002
	C.V.	1.14	1.02	4.40	1.53	3.11

### 5.2.3.3 Análisis de metales traza

La concentración de los elementos traza Ni, Cr y Pb, se determinaron por espectrometría de absorción atómica (EAA), mediante el módulo de horno de grafito con un automuestreador Thermo Electron Corporation (modelo GF597). Los materiales utilizados se enlistan a continuación.

- Vaso de Teflón PFA
- Cucharas para pesar
- Plumón indeleble
- Rejillas para las bombas
- Carrusel
- 1 micropipeta (100 µL) BIOHT Proline
- 1 micropipeta (5 mL) BIOHT Proline
- Tubos cónicos para centrifuga
- Puntas para micropipetas
- Frascos de polietileno
- Matraces volumétricos aforados clase "A" pyrex (50 mL)
- Matraces volumétricos aforados clase "A" pyrex (10 mL)

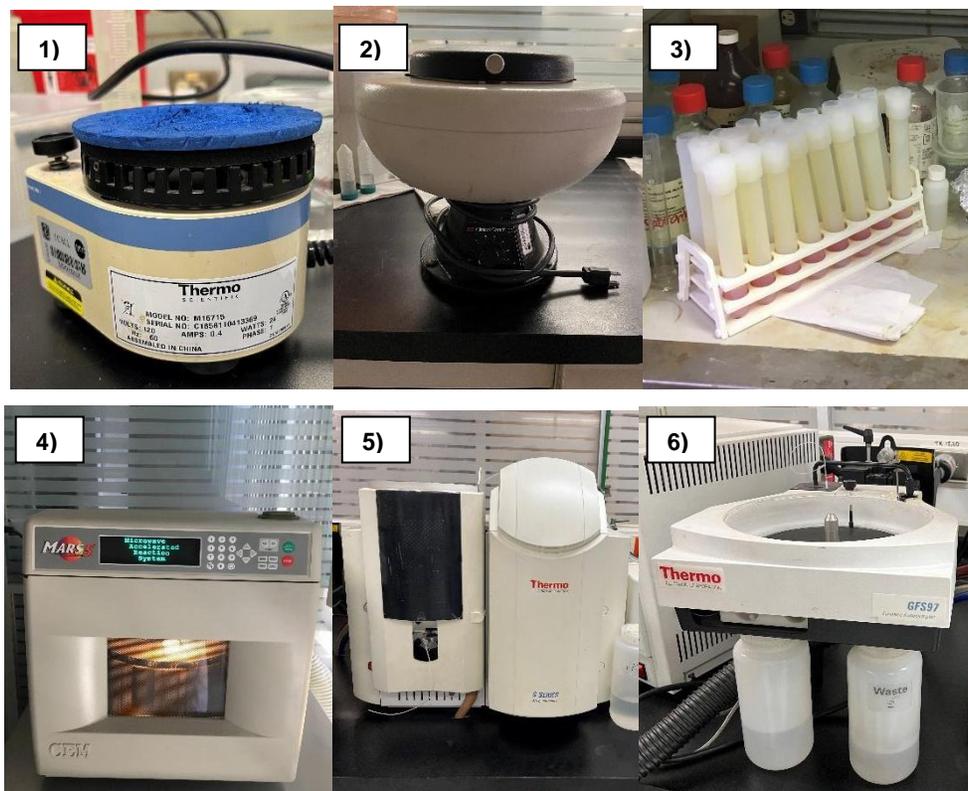


Figura 12. 1)Agitador Thermo Scientific, 2)Centrifuga IEC, 3)Vasos de digestión (Teflón PFA), 4)Digestor microondas CEM, 5)Espectrómetro de Absorción Atómica y 6)Automuestreador Thermo Scientific.

El gas empleado por el EAA fue Argón UAP. El método fue validado a partir de estándares certificados del consulado canadiense CNRC. Se digirieron los estándares bajo las mismas condiciones que las muestras. El límite de detección se calculó utilizando el método de Miller (2002). En la Tabla 4 se describe los resultados de la validación.

Tabla 4. Resultados de validación para el análisis de Ni, Cr y Pb por EAA en horno de grafito.

Elemento	Estándar certificado	Valor teórico ppm	Resultado promedio ppm	Desviación estándar	C.V.	Recuperación %	L.D. ppm	L.C. ppm
Ni	HISS-1	2.16± 0.29	2.05±.3288	0.26	12.93	97.17	0.015	0.0499
Cr	MESS-3	105± 4	103.25±7.6	7.25	7.02	98.33	0.0023	0.0076
Pb	HISS-1	3.13 ± 0.40	3.43±.10	0.16	4.59	109.58	0.0023	0.0076

Se usaron frascos de polietileno para almacenar las muestras digeridas, los cuales se lavaron previamente con EXTRAN al 2%, después con las soluciones de HCl al 30%, HNO<sub>3</sub> al 30%, agua destilada y agua tipo I (resistividad 18.2 MΩ cm) por 24 horas o utilizando

ultrasonido por 20 minutos en cada etapa. En la digestión de los sedimentos, se utilizó 0.5 g de muestra molida y seca, que se colocó en vasos de digestión (Teflón PFA) con una mezcla de 5 mL de HNO<sub>3</sub>, 4 mL de HCl y 1 mL de HF. La digestión de las muestras se realizó en un sistema de microondas de reacción acelerada CEM, modelo MarsXpress, con el programa SEDHG-Express que trabaja a una potencia de 1200 W, en dos etapas: a 100°C durante 20 minutos y 130°C durante 40 minutos. Se dejaron enfriar las bombas de teflón y el contenido se vació en tubo de centrífuga previamente adicionados con 0.15 g de ácido bórico (H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>), aforándose a la marca de 20 mL usando agua tipo I. Posteriormente se homogeneizaron las digestiones usando el equipo Thermo Vortex Maxi Mix I, hasta disolver el H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>; posteriormente se centrifugaron los tubos en un equipo IEC Clinical Centrifuge a 5000 rpm por 10 minutos. Luego, se pesaron los tubos de centrífuga con la digestión, se decantó la muestra a un frasco de polietileno etiquetado con el número de muestra, nombre del núcleo, así como la fecha. Adicionalmente, se digirieron blancos de reactivo siguiendo el mismo proceso, pero sin adicionar muestra. Finalmente se digirieron los estándares certificados (Mess-3, PACS-2, HISS-1), bajo las mismas condiciones que las muestras. Al final las muestras se refrigeran hasta su análisis.

#### **5.2.3.3.1 Análisis de Níquel (Ni)**

El espectrómetro de absorción atómica fue optimizado para obtener la concentración de Ni en las muestras con las condiciones que se muestran en la Tabla 5.

*Tabla 5. Configuración para análisis de Ni por EAA en horno de grafito.*

Longitud de onda, $\lambda$ (nm)	232 nm
Ancho de abertura (nm)	0.2 nm
Tipo de medición	Absorbancia
Corrector de fondo	Lámpara de deuterio
Volumen de la muestra ( $\mu$ L)	20.0
Gas	Argón

Para el análisis se realizó una curva de calibración, que incluyó 7 puntos (0, 25, 50, 75, 100, 150 y 200 ppb), utilizando un estándar certificado de High-Purity de 1000 ppm, obteniéndose un factor de correlación de 0.9988 (Figura 13).

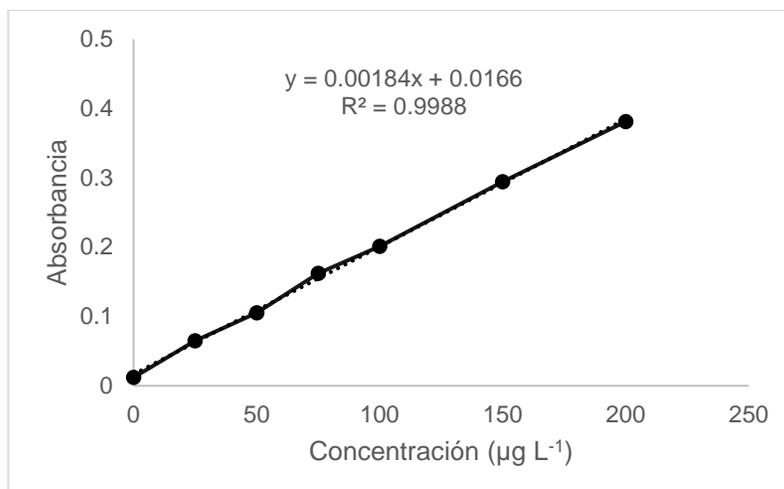


Figura 13. Curva de calibración para Ni.

#### 5.2.3.3.2 Análisis de Cromo (Cr)

El espectrómetro de absorción atómica fue optimizado para obtener la concentración de Cr en las muestras de sedimento con las siguientes condiciones (Tabla 6).

Tabla 6. Configuración para análisis de Cr por EAA en horno de grafito

Longitud de onda, $\lambda$ (nm)	357.9
Ancho de abertura (nm)	0.5
Tipo de medición	Absorbancia
Corrector de fondo	Lámpara de deuterio
Volumen de la muestra ( $\mu\text{L}$ )	1.0
Gas	Argón

En el análisis se realizó mediante una curva de calibración que incluyó 5 puntos (0, 20, 40, 60, 80 ppb), utilizando un estándar certificado de High-Purity de 1000 ppm, obteniéndose un factor de correlación de 0.9994 (Figura 14).

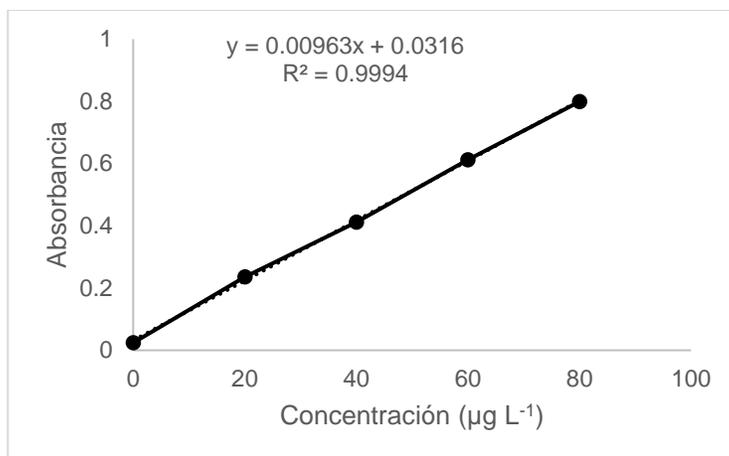


Figura 14. Curva de calibración para Cr.

### 5.2.3.3.3 Análisis de Plomo (Pb)

El espectrómetro de absorción atómica fue optimizado para obtener la concentración de Pb en las muestras de sedimento con las siguientes condiciones (Tabla 7).

Tabla 7. Configuración para análisis de Pb por EAA en horno de grafito.

Longitud de onda, $\lambda$ (nm)	217.0
Ancho de abertura (nm)	0.5
Tipo de medición	Absorbancia
Corrector de fondo	Lampara de Deuterio
Modificadores empleados	Nitrato de Mg
Volumen de modificadores ( $\mu\text{L}$ )	10
Volumen de la muestra ( $\mu\text{L}$ )	2.0
Gas	Argón

Para el análisis se utilizó una curva mediante la cual, se calibró el equipo, utilizando 5 puntos (0, 5, 20, 30, 60 ppb), a partir de un estándar certificado de High-Purity de 1000 ppm, obteniéndose un factor de correlación de 0.9989 (Figura 15).

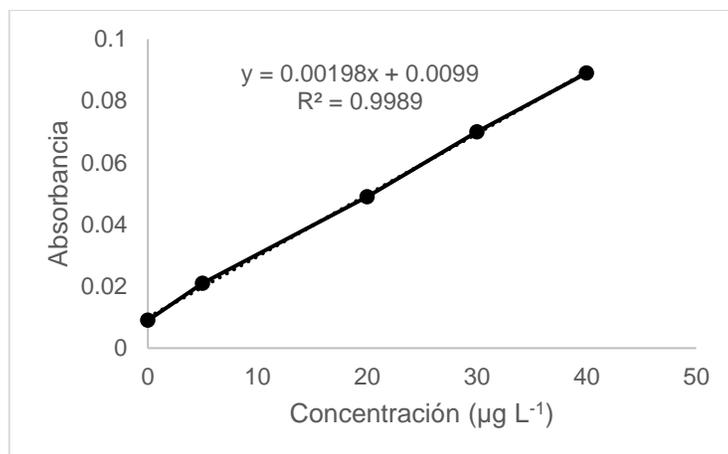


Figura 15. Curva de calibración para Pb.

### 5.3 Legislación aplicable

Con el fin de conocer el grado de contaminación de los sedimentos del área de estudio se debe comparar con un valor que represente la concentración natural o bien, establezca el límite máximo permisible, a partir del cual represente un riesgo para la salud. A nivel nacional no se cuentan con criterios específicos para delimitar los valores máximos permisibles de metales y metaloides en sedimentos; únicamente se cuenta con la Norma Oficial Mexicana de "Criterios para la Determinación de Suelos Contaminados por Metales Pesados" (NOM-147-Semarnat/ SSA1, 2004). Sin embargo, a nivel internacional la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA) se dedica a identificar los impactos potenciales a los recursos costeros y hábitats por parte de los desechos peligrosos. De esta manera se han generado tablas en las cuales se pueden consultar distintos valores de referencia. Para el presente trabajo se tomaron los valores de TEL y PEL, los cuales corresponden al nivel de umbral de efectos y el nivel de efectos probables, respectivamente (Buchman, 2008).

Tabla 8. Valores de concentración de referencia total en la norma internacional. (LEL: nivel de efecto más bajo, SEL: nivel de efecto severo).

Elemento	NOAA (µg g <sup>-1</sup> )	
	TEL	PEL
Cr	52.30	160.00
Ni	15.90	42.80
Pb	30.24	112,00

## 6. Resultados

### 6.1 Materia orgánica

En el núcleo LT01 el valor mínimo de materia orgánica (MO) es 11.2% y el máximo es 17.3%. Para el caso del núcleo LT02 fue de 11.4% y 15.7%, mientras que, en LT03 se tienen contenidos de 13.1% y 17.5% (Anexos 1, 2 y 3). El valor promedio de MO en los núcleos de sedimento LT01, LT02 y LT03 fue de 14.3, 13.8 y 15.3 %, respectivamente; el análisis de varianza (ANOVA; Anexo 17A), indicó que no se puede afirmar que las medias sean iguales ( $p < 0.05$ ) y la prueba de Tukey-Kramer (T-K) determinó que existe una diferencia significativa ( $p < 0.05$ ) entre los promedios de LT01 y LT03, así como en LT02 y LT03. Además, se observó que el núcleo LT03 es el que contiene la mayor concentración de MO (17.5%), mientras que el valor mínimo (11.4%) pertenece a LT02.

En cuanto a las concentraciones de MO a lo largo de los núcleos (Figura 16), se observa que, en los tres casos, los valores disminuyen en relación al aumento en la profundidad, siendo LT01 y LT03, los que disminuyen de manera más uniforme en comparación con el núcleo LT02, que presenta mayores variaciones en la distribución del contenido de MO. La prueba t de Student ( $p < 0.05$ ) en LT02, indicó que la porción que abarca de la superficie a los 10 cm de profundidad presenta contenidos de MO distintos y mayores a los que se encuentran de los 12 cm y hasta la base del núcleo. De igual manera, para LT01, sus mayores concentraciones se encuentran en los 18 cm de la parte superior del núcleo, igual que en LT03.

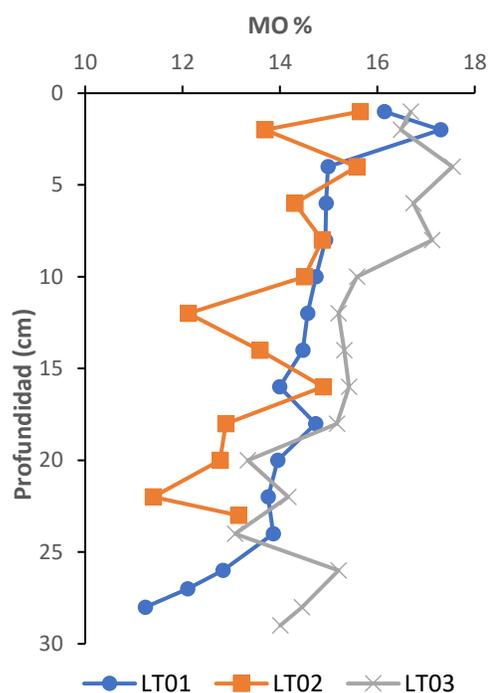


Figura 16. Perfiles de materia orgánica (%) en los núcleos LT01, LT02 y LT03.

## 6.2 Carbonatos

El núcleo LT01 tiene un contenido máximo de carbonatos de 14.3% y un mínimo de 9.1%. En LT02, sus contenidos varían entre 15.7 y 11.8%, mientras que, en LT03 encontramos un valores de 12.5 a 4.1% (Anexos 1, 2 y 3). Los contenidos promedio de carbonatos entre los núcleos es distinto (Anexo 17B), ya que presentan una diferencia significativa según la prueba T-K ( $p < 0.05$ ), siendo el núcleo LT03 el que tiene el valor promedio más bajo con un 8.5%, mientras que los núcleos LT01 y LT02 tienen valores de 11.6 y 13.8%.

Los perfiles de carbonatos, en los tres núcleos, mostraron tendencias distintas con respecto al aumento en la profundidad (Figura 17). En LT01 se observa un aumento en el contenido de carbonatos en las secciones más profundas del núcleo, mientras que LT02 exhibe variaciones a lo largo del perfil; sin embargo, LT02 no exhibe un claro aumento o disminución en los valores de carbonatos, lo cual se confirmó con la prueba t Student, que indicó que no hay una diferencia significativa ( $p < 0.05$ ), entre los valores que van de la superficie hasta los 10 cm de profundidad y los valores observados de los 12 cm y hasta la

base del núcleo. Por otro lado, el núcleo LT03 muestra una clara disminución en los valores de carbonatos en con el aumento en la profundidad.

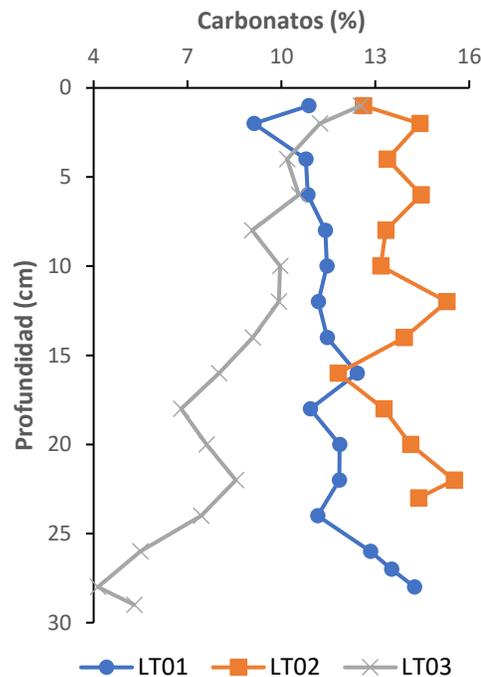


Figura 17. Perfiles de carbonatos (%) en los núcleos LT01, LT02 y LT03.

### 6.3 Tamaño de partícula

A partir del análisis de distribución de tamaño de partícula, se obtuvo que la textura de los sedimentos que predomina en los tres núcleos son los limos (54.2-72.1% en LT01, promedio de 65.8%; 64.0-71.7% en LT02, promedio de 68.4%; 47.8-59.7% en LT03, promedio de 51.8%), seguida de la fracción de arcillas (30.5-23.1% en LT01, promedio de 26.8%; 28.8-26.0% en LT02, promedio de 27.3%; 43.7-26.9% en LT03, promedio de 38.0%) y finalmente las arenas (8.3-1.2% en LT01, promedio de 4.3%; 4.3-8.3% en LT02, promedio de 4.3%; 16.0-5.4% en LT03, promedio de 10.2%) (Anexos 4, 5 y 6). Sin embargo, según la prueba de ANOVA para los promedios de los tres tamaños de partículas, se encuentran diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) (Anexos 19A, B y C). La prueba T-K señala que las únicas medias que no presentan una diferencia significativa ( $p < 0.05$ ), son los valores de los limos y arcillas de los núcleos LT01 y LT02. Los núcleos LT01 y LT02 tienen contenidos muy similares y menores de arcillas, en comparación el núcleo LT03, que presenta un mayor porcentaje en promedio. Contrario a lo que sucede en el caso de la fracción de los limos,

donde LT03 tiene menor cantidad en promedio, con respecto a los núcleos LT01 y LT02, que contienen valores similares.

En el núcleo LT01 se observa una tendencia en los limos a disminuir desde los 10 cm de profundidad y hasta la base (Figura 18), mientras que en LT02 y LT03, su distribución no muestra una clara tendencia. En el caso de las arcillas en los núcleos LT01 y LT02 se observan valores homogéneos y constantes, contrario a lo que ocurre en el núcleo LT03, que presenta un comportamiento errático. Para el contenido de arenas, en el núcleo LT01 se tiene un aumento desde los 6 cm de profundidad, en LT02 los valores se mantienen homogéneos y LT03 tiene una disminución errática desde los 6 cm de profundidad.

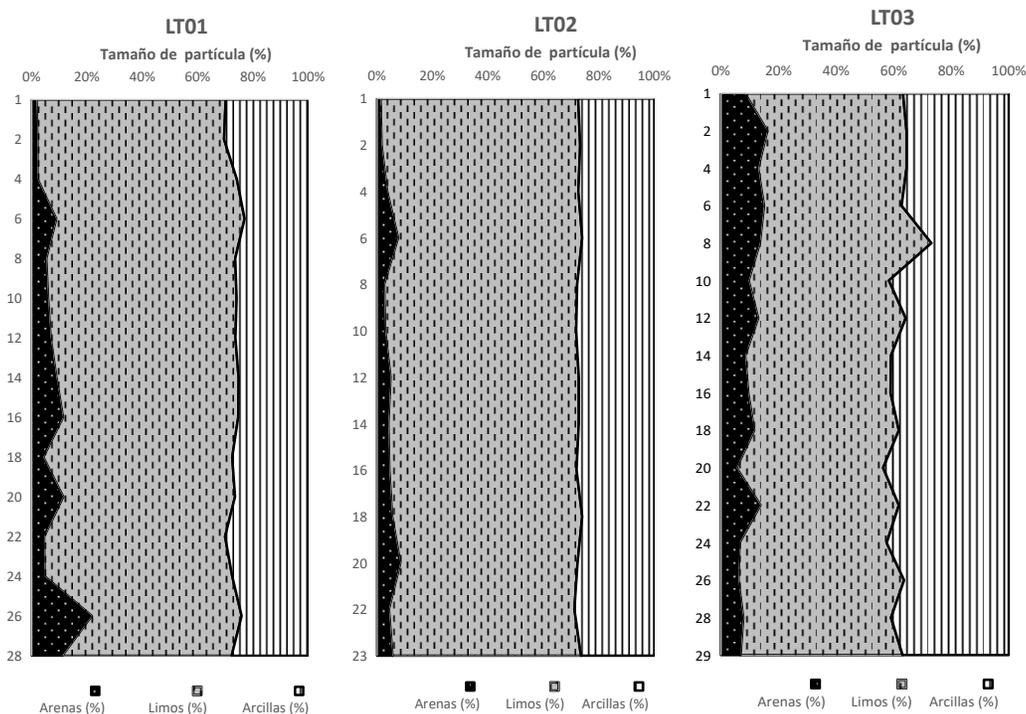


Figura 18. Distribución de tamaño de grano de los núcleos de sedimento LT01, LT02 y LT03.

A partir de la nomenclatura de los sedimentos basada en el contenido relativo de arenas, limos y arcillas propuesta por Shepard (1954) y utilizando el diagrama ternario del mismo autor, se graficaron los valores de cada uno de los núcleos de sedimento para observar las tendencias en la distribución de tamaño de partícula, en cada una de las secciones. Los diagramas muestran una clara predominancia en la constitución de los sedimentos, siendo que todas las secciones de los tres núcleos están formadas por limos arcillosos, a excepción de la sección 25-26 cm de LT01, la cual está formada por limos

arcillo-arenosos. A pesar de que los tres núcleos se encuentran dentro de la misma categoría, LT01 y LT02 tienen valores muy similares y se encuentran más cercanos a los limos, mientras que LT03 se encuentra cercano a la arcilla limosa (Figura 19).

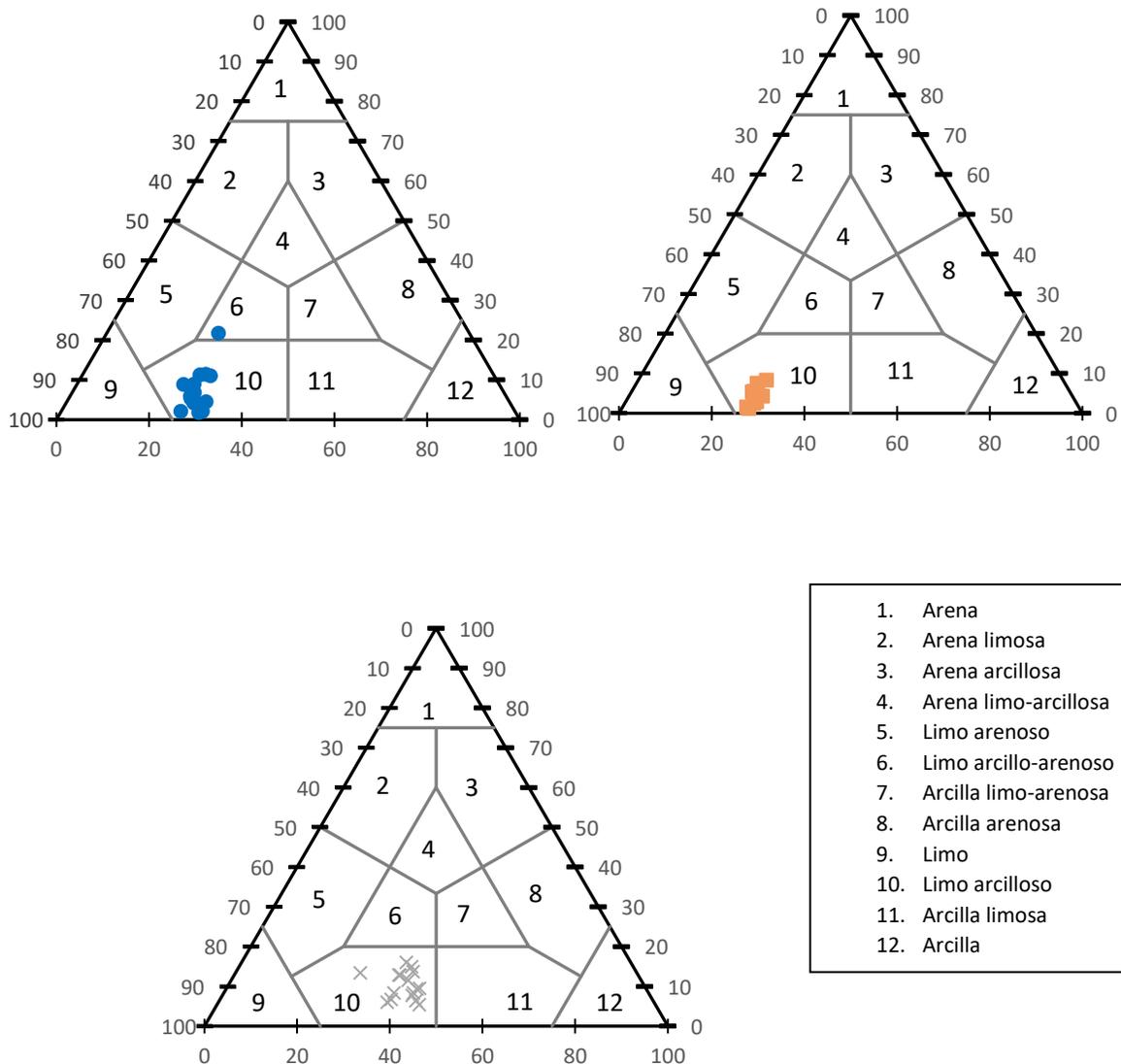


Figura 19. Diagrama ternario de tamaño de partícula en núcleos de sedimento LT01, LT02 y LT03.

#### 6.4 Elementos mayores

La distribución a lo largo de los tres núcleos de sedimento de las concentraciones de los elementos mayores analizados a partir de Espectrofotometría de Fluorescencia de Rayos X (XRF), se muestra en las Figuras 20, 21 y 22. Las tablas que registran las concentraciones (%) de cada uno de los elementos se encuentran en los anexos 7, 8 y 9. Los valores reportados para los tres núcleos, de manera general, son comparables. En los

tres núcleos los compuestos en orden de abundancia son:  $\text{SiO}_2$  (30.8-38.0% en LT01, 28.6-35.2% en LT02 y 32.9-52.3% en LT03),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (8.4-10.3% en LT01, 7.8-9.6% en LT02 y 8.3-13.4% en LT03),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (3.8-4.6% en LT01, 3.5-4.1% en LT02 y 3.4-5.3% en LT03),  $\text{TiO}_2$  (0.38-0.48% en LT01, 0.32-0.44% en LT02 y 0.36-0.64% en LT03) y  $\text{MnO}$  (0.06-0.08% en LT01, 0.05-0.07% en LT02 y 0.04-0.07% en LT03), representando ~48% de la composición de los sedimentos analizados.

Al utilizar los ANOVA para  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y  $\text{MnO}$  (Anexos 19D, 19E, 19F, 19G y 19H), se encontraron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre los tres núcleos y al hacer la prueba T-K, se observó que únicamente no existe una diferencia significativa ( $p < 0.05$ ) para las concentraciones de  $\text{TiO}_2$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  en LT01 y LT03. Las concentraciones de estos elementos en LT01 como LT02, presentan comportamientos erráticos a lo largo de los núcleos, en las que se identificaron secciones en el que disminuyen los valores, seguidas de partes en las que aumentan; a diferencia, el núcleo LT03 que presenta tendencias más claras, por ejemplo,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  disminuyen desde la base del núcleo y hasta la parte más somera, mientras que  $\text{MnO}$  tiene valores homogéneos.

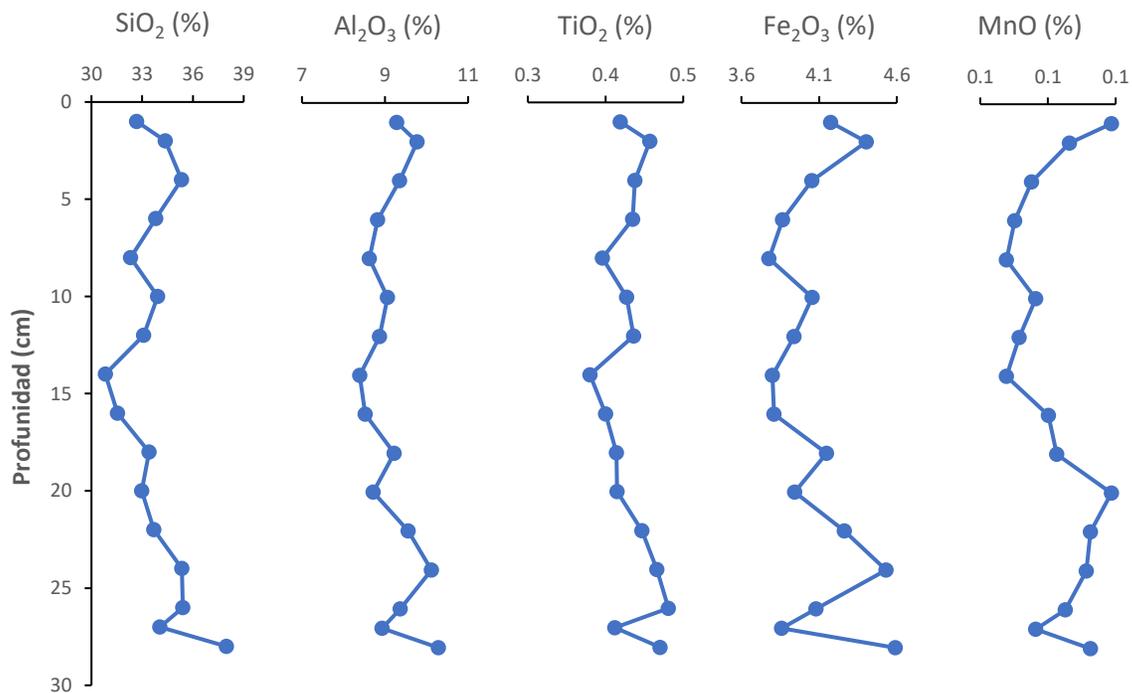


Figura 20. Concentración de elementos mayores en el núcleo LT02.

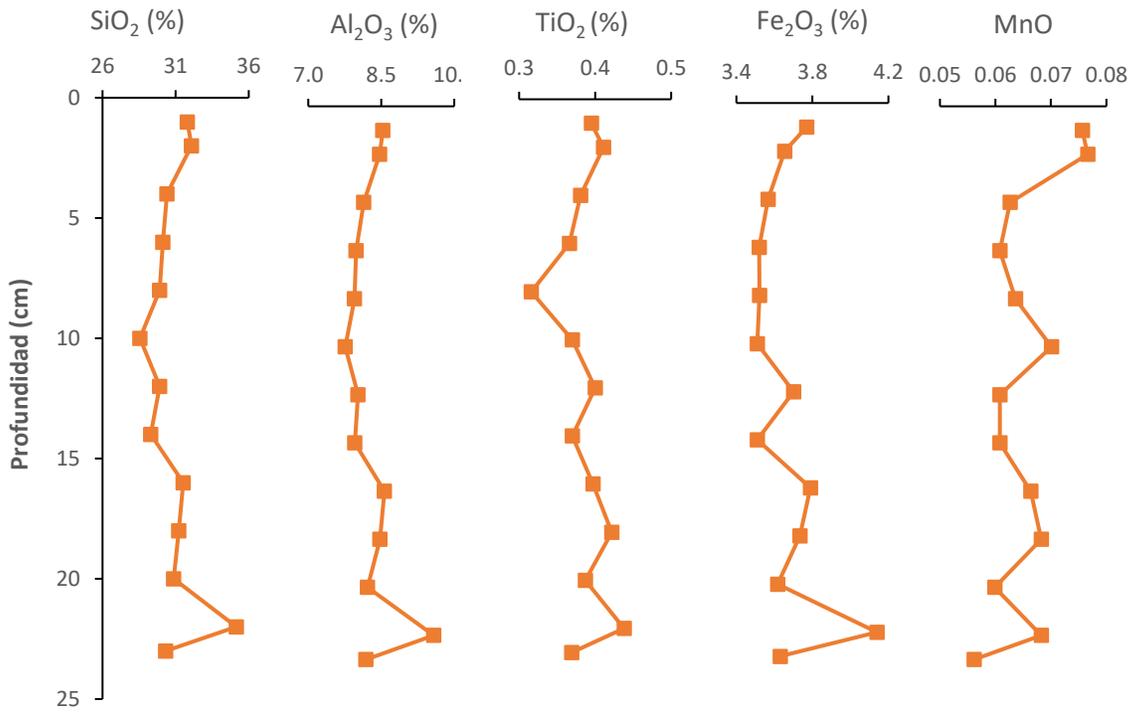


Figura 21. Concentración de elementos mayores en el núcleo LT02.

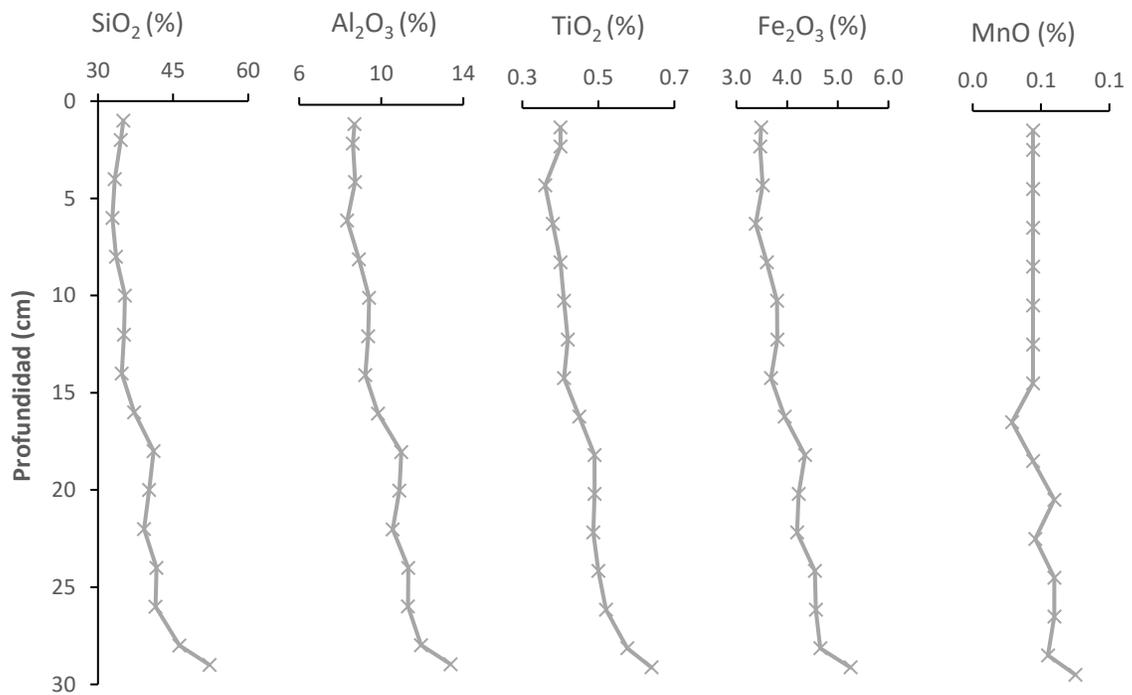


Figura 22. Concentración de elementos mayores en el núcleo LT03.

## 6.5 Metales traza

### 6.5.1 Plomo (Pb)

En la Figura 23 se presentan los perfiles de concentraciones de Pb de los núcleos de sedimento. Las concentraciones para cada una de las secciones de los núcleos se encuentran en el Anexo 10. Las concentraciones de Pb en LT01 ( $6.89- 18.81 \mu\text{g g}^{-1}$ ), LT02 ( $7.47- 19.16 \mu\text{g g}^{-1}$ ) y LT03 ( $7.51- 18.04 \mu\text{g g}^{-1}$ ) son comparables. El valor promedio observado en el núcleo LT01 es de  $13.50 \pm 3.28 \mu\text{g g}^{-1}$ , en LT02 es de  $12.15 \pm 3.40 \mu\text{g g}^{-1}$  y en LT03 de  $11.24 \pm 3.40 \mu\text{g g}^{-1}$ . A partir de un ANOVA de los tres núcleos (Anexo 19A), se puede afirmar que no existe una diferencia significativa ( $p < 0.05$ ) entre las medias de los núcleos. El núcleo LT02 presenta la concentración más alta de Pb (7-8 cm de profundidad), con un valor de  $19.16 \mu\text{g g}^{-1}$ , mientras que el valor más bajo reportado en los tres núcleos se encuentra en LT01 (sección 25-26 cm) con un valor de  $6.89 \mu\text{g g}^{-1}$ . Los perfiles de Pb en los núcleos LT01 y LT02 muestra un comportamiento errático; es así que la prueba t de Student indicó que no existe diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre los valores de Pb, que incluye las secciones de sedimento hasta los 14 cm de profundidad y de los 16 cm hasta la base de LT01; lo mismo sucede con los valores de Pb que van de la superficie de LT02, hasta los 10 cm de profundidad y aquellos valores observados de los 12 cm de profundidad hasta la base. En el núcleo LT03 existe una tendencia en el contenido de Pb a aumentar hacia la superficie, con un comportamiento errático desde los 16 cm de profundidad y hasta la superficie.

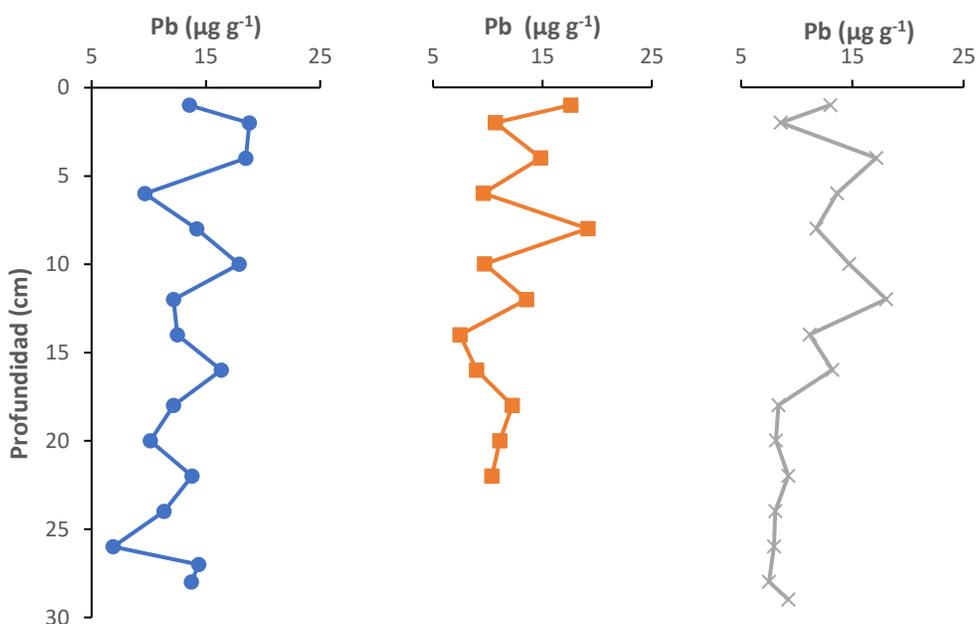


Figura 23. Concentraciones de Pb en los núcleos de sedimento LT01 (azul), LT02 (naranja) y LT03 (gris).

### 6.5.2 Níquel (Ni)

La distribución de las concentraciones de Ni a lo largo de los tres núcleos de sedimento se muestra en la Figura 24 (Anexo 11). Las concentraciones de Ni en LT01 (98.18- 160.76  $\mu\text{g g}^{-1}$ ), LT02 (92.83- 118.49  $\mu\text{g g}^{-1}$ ) y LT03 (93.86- 156.30  $\mu\text{g g}^{-1}$ ) son comparables. Los valores promedio para cada uno de los núcleos son  $117.19 \pm 13.32 \mu\text{g g}^{-1}$  en LT01,  $104.33 \pm 7.20 \mu\text{g g}^{-1}$  en LT02 y  $119.84 \pm 19.74 \mu\text{g g}^{-1}$  en LT03. La mayor concentración (160.76  $\mu\text{g g}^{-1}$ ) se presenta en la sección de 17-18 cm de profundidad, en el núcleo LT01, mientras que el valor mínimo (92.83  $\mu\text{g g}^{-1}$ ), se ubica en la sección 3-4 cm del núcleo LT02. El ANOVA (Anexo 19B), indicó que existe una diferencia significativa ( $p < 0.05$ ), entre las medias de los tres núcleos y a partir de la prueba T-K se define que, los únicos núcleos que no presentan una diferencia honestamente significativa ( $p < 0.05$ ) en su media, son LT01 y LT03. El único núcleo que presenta una tendencia de decrecimiento hacia la superficie en el contenido de Ni es el núcleo LT03, a diferencia de los núcleos LT01 y LT02 que mantienen concentraciones homogéneas.

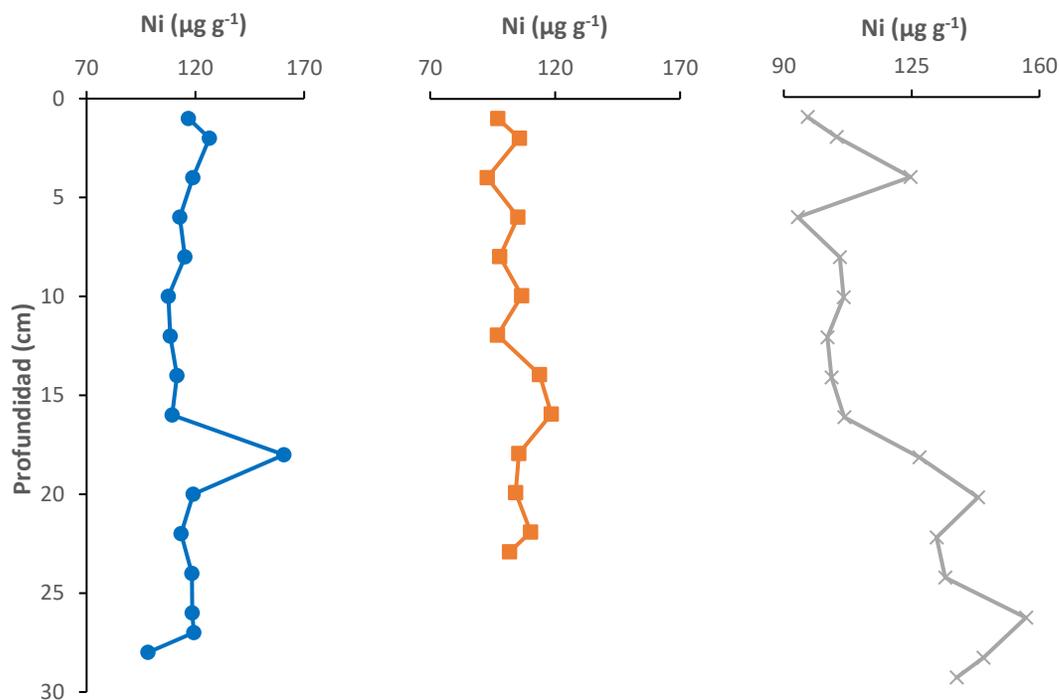


Figura 24. Perfiles de concentración de Ni en los núcleos de sedimento LT01 (azul), LT02 (naranja) y LT03 (gris).

### 6.5.3 Cromo (Cr)

En la Figura 2 se presentan los perfiles de Cr para los núcleos de sedimento, en tanto las concentraciones de cada una de las secciones se encuentran en el Anexo 12. Las concentraciones de Ni en LT01 (132.80- 187.47  $\mu\text{g g}^{-1}$ ), LT02 (118.63- 183.06  $\mu\text{g g}^{-1}$ ) y LT03 (142.24- 292.10  $\mu\text{g g}^{-1}$ ) son comparables. La concentración promedio de Cr en el núcleo LT01 es de  $161.70 \pm 15.36 \mu\text{g g}^{-1}$ , en LT02 es de  $151.28 \pm 18.71 \mu\text{g g}^{-1}$  y en LT03 es de  $204.39 \pm 51.06 \mu\text{g g}^{-1}$ . A partir del ANOVA (Anexo 19C), se declara que existe una diferencia significativa ( $p < 0.05$ ) entre los valores de las medias de los tres núcleos. Usando la prueba T-K se puede afirmar que las únicas medias que no presentan una diferencia significativa son los núcleos LT01 y LT02. La concentración máxima se encuentra en LT03, en la sección 28-29 cm de profundidad, con un valor de  $292.09 \mu\text{g g}^{-1}$  y la concentración mínima se observó en la sección de 0-1 cm del núcleo LT02, con un valor de  $118.63 \mu\text{g g}^{-1}$ . Tanto el núcleo LT01 como el núcleo LT02 no presentan una tendencia clara en los contenidos de Cr; por otro lado, el núcleo LT03 muestra un decrecimiento en los valores de Cr de la base del núcleo a la superficie.

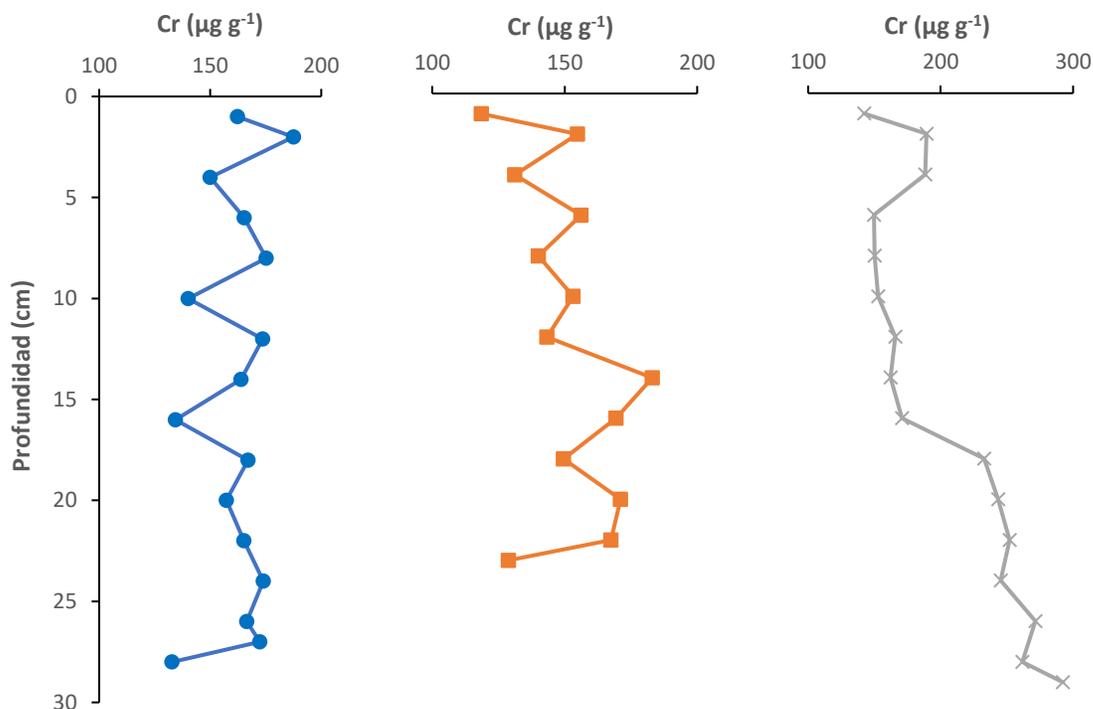


Figura 25. Perfiles de concentración de Cr en los núcleos de sedimento LT01 (azul), LT02 (naranja) y LT03 (gris).

## 6.6 Radiocronología con $^{210}\text{Pb}$

### 6.6.1 Actividad de $^{210}\text{Pb}$ total

En la Figura 26 se muestran los perfiles de la actividad ( $\text{Bq kg}^{-1}$ ) de  $^{210}\text{Pb}$  total ( $^{210}\text{Pb}_{\text{tot}}$ ) de los núcleos de sedimento. Los datos obtenidos para cada una de las secciones se muestran en los anexos 13, 14 y 15. Los intervalos de actividad de  $^{210}\text{Pb}_{\text{tot}}$  para los núcleos son: 35.4 a 72.3  $\text{Bq kg}^{-1}$  en LT01, 32.7 a 63.1  $\text{Bq kg}^{-1}$  en LT02 y 12.3 a 81.3  $\text{Bq kg}^{-1}$  en LT03. La distribución de la actividad de  $^{210}\text{Pb}_{\text{tot}}$  con respecto a la profundidad fue semejante en los registros sedimentarios, ya que disminuye desde las secciones más someras a la base de los núcleos. Únicamente en LT03 se observa una región asintótica (i.e., profundidad 17.5-28.5 cm).

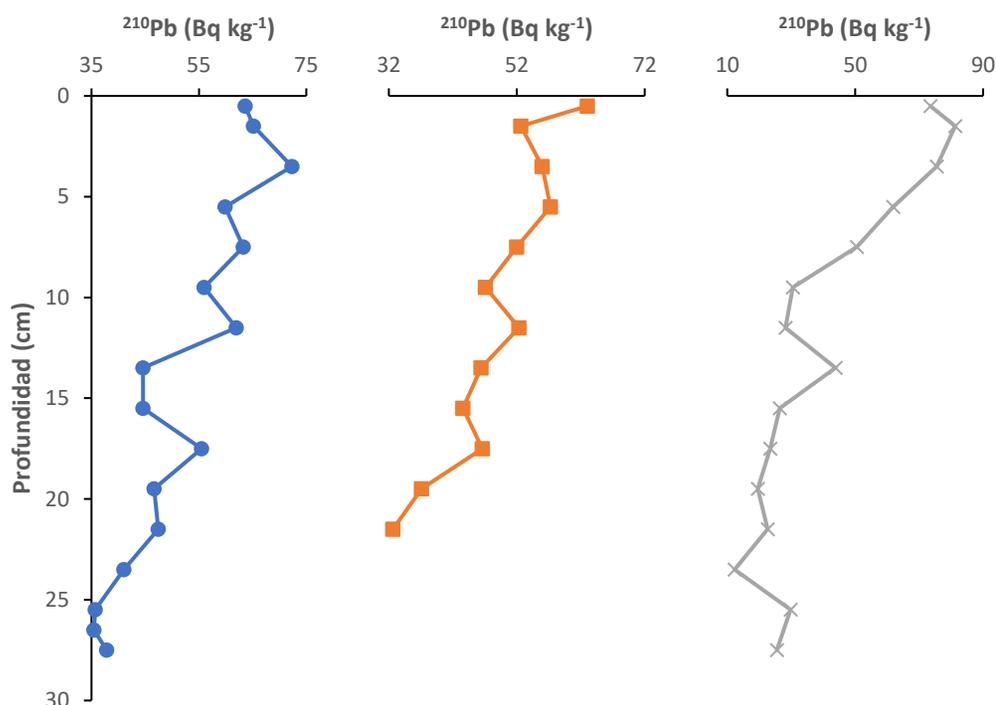


Figura 26. Actividad de  $^{210}\text{Pb}_{\text{tot}}$  contra profundidad (cm) de los núcleos de sedimento LT01 (azul), LT02 (naranja) y LT03 (gris).

### 6.6.2 Actividad de $^{210}\text{Pb}$ de base y $^{210}\text{Pb}$ en exceso

El valor de la actividad de  $^{210}\text{Pb}$  de base ( $^{210}\text{Pb}_{\text{base}}$ ) en los núcleos se estimó a partir de la actividad de  $^{226}\text{Ra}$ , medido por espectrometría gamma (Sánchez-Cabeza y Ruiz-Fernández, 2012). Los valores de  $^{210}\text{Pb}_{\text{base}}$ , así como los intervalos de  $^{210}\text{Pb}$  en exceso ( $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ ), se encuentran en el Anexo 16. Los intervalos de los valores de  $^{226}\text{Ra}$  para el núcleo LT01 fueron de 16.9 a 22.2  $\text{Bq kg}^{-1}$ , para LT02 fueron de 17.5 a 23.4  $\text{Bq kg}^{-1}$  y para LT03

fueron de 18.5 a 25.0 Bq kg<sup>-1</sup>. De esta forma, los valores de <sup>210</sup>Pb<sub>base</sub> en cada uno de los núcleos fue de 18.9 ± 1.7 Bq kg<sup>-1</sup> en LT01, 20.4 ± 8.3 Bq kg<sup>-1</sup> en LT02 y 20.5 ± 1.5 Bq kg<sup>-1</sup> en LT03.

### **6.6.3 Radiocronología con <sup>210</sup>Pb**

Para la obtención de los modelos de edad en los núcleos sedimentarios, se utilizó el modelo de flujo constante (CF), cuya hipótesis postula que el flujo de <sup>210</sup>Pb atmosférico a la superficie del sedimento es constante, mientras que el aporte de sedimentos puede no serlo. De esta manera, se puede calcular tanto la tasa de acumulación másica (TAM, g cm<sup>-2</sup> año<sup>-1</sup>), así como la tasa de acumulación sedimentaria (TAS, cm año<sup>-1</sup>) para cada sección. Las fechas más antiguas detectadas en los núcleos fueron: 1976±9 años en el núcleo LT01, 1983±13 años en el núcleo LT02 y 1876±84 años en el núcleo LT03.

### **6.7 Tasas de acumulación másica y sedimentaria**

En las figuras 27, 28 y 29 se muestran los perfiles con las tasas de acumulación másicas (TAM) y las tasas de acumulación sedimentaria (TAS), para los núcleos de sedimento. Los valores obtenidos de TAS y TAM se reportan en los anexos 13, 14 y 15. En el núcleo LT01 se identificaron valores de la TAM de entre 0.33 a 0.61 g cm<sup>-2</sup> año<sup>-1</sup> y para la TAS de 0.31 a 1.40 cm año<sup>-1</sup>. Tanto en el perfil de la TAM como en la TAS se observa un comportamiento en el que existe una ligera disminución desde las edades más antiguas (~1976) encontradas en el núcleo y hasta 1990, para después comenzar un aumento hacia las secciones más recientes (2020); sin embargo, este comportamiento no es constante, ya que se ven pronunciadas variaciones entre los valores.

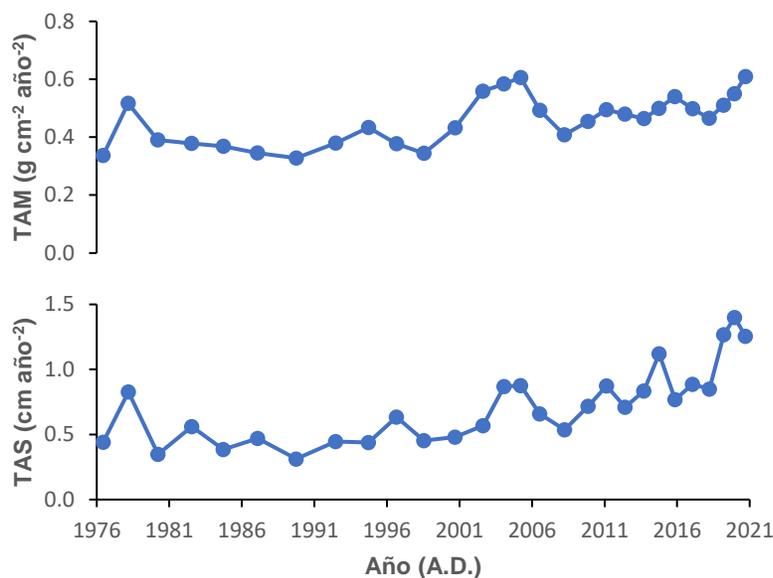


Figura 27. Perfiles de las tasas de acumulación másica (TAM) y sedimentaria (TAS) del núcleo de sedimento LT01.

En el núcleo LT02, los valores para TAM se encuentran entre 0.40 a 0.69 g cm<sup>-2</sup> año<sup>-1</sup> y la TAS de 0.30 a 1.93 cm año<sup>-1</sup>. El comportamiento es casi homogéneo, tanto para la TAM como para la TAS, hasta que en el 2008 inicia un aumento para ambas tasas y que en el año 2020 presentan pico alcanzando sus valores máximos.

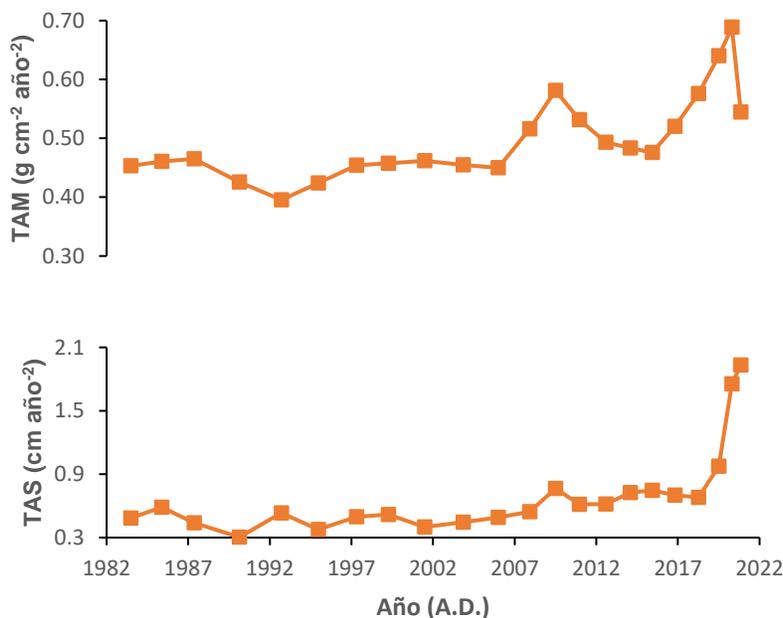
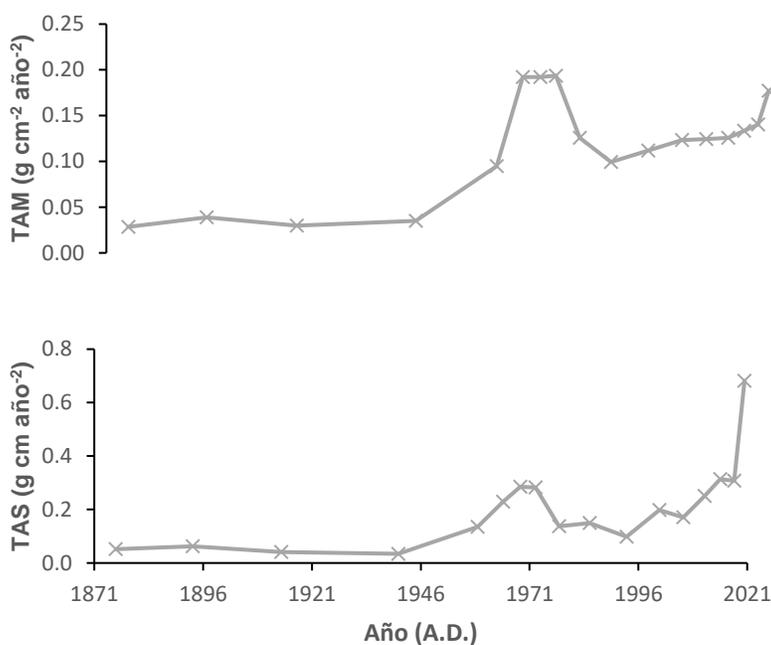


Figura 28. Perfiles de las tasas de acumulación másica (TAM) y sedimentaria (TAS) del núcleo de sedimentos LT02.

Finalmente, en LT03 los valores para TAM se encuentran entre  $0.03$  y  $0.19 \text{ g cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$  y la TAS en  $0.03$  y  $0.68 \text{ cm año}^{-1}$ . Los valores de la TAM ( $0.03$ - $0.04 \text{ g cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$ ) y la TAS ( $0.03$ - $0.05 \text{ cm año}^{-1}$ ) desde las edades más antiguas de las que se tienen registro en el núcleo ( $\sim 1876$ ) y hasta la década de los 1940s son homogéneos. Después, comienza un importante aumento que alcanzará el valor más alto para la TAM ( $0.19 \text{ g cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$ ) entre 1965-1972 y entre 1969-1972 para la TAS ( $0.28$ - $0.29 \text{ cm año}^{-1}$ ). Después se observó un aumento menor hasta que, en secciones recientes ( $\sim 2020$ ), hay un gran aumento para las dos tasas, siendo estos los valores más altos ( $0.19 \text{ g cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$  y  $0.68 \text{ cm año}^{-1}$ ).



*Figura 29. Perfiles de las tasas de acumulación másica (TAM) y sedimentaria (TAS) del núcleo de sedimento LT03.*

A partir de un ANOVA (Anexos 20F y 20G), se determinó que existe una diferencia significativa ( $p < 0.05$ ) entre las medias tanto para la TAM como para la TAS de los tres núcleos de sedimento; mediante la prueba de T-K se encontró que las medias para la TAS y TAM de los núcleos LT01 y LT02 no presentan una diferencia honestamente significativa ( $p < 0.05$ ).

## 7. Discusión

### 7.1 Radiocronología con $^{210}\text{Pb}$

Bajo las condiciones de sistema cerrado, se esperaría que la actividad de  $^{210}\text{Pb}$  decrezca de manera exponencial con el aumento de profundidad, debido a la desintegración del radionúclido (Sánchez-Cabeza et al., 2012). Es así como los perfiles de la actividad de  $^{210}\text{Pb}$  en los núcleos LT01, LT02 y LT03 muestran, en general, el comportamiento esperado. Tanto en LT01 como en LT02, las edades más antiguas registradas en las secciones del fondo (i.e., 27-28 cm de profundidad en LT01 y 21-22 cm de profundidad en LT02), no sobrepasaron los 50 años ( $1976 \pm 9$  y  $1983 \pm 13$ ), a diferencia del núcleo LT03, en el cual se reportó una edad de  $1876 \pm 84$  años a los 16.5 cm de profundidad. A pesar de que los núcleos se recolectaron a profundidades similares (LT01: 28 cm, LT02: 23 cm y LT03: 29 cm), las diferencias en los modelos de edad son producto de variaciones en las TAM y TAS, para las cuales LT01 ( $0.33\text{-}0.61 \text{ g cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$  y  $0.31\text{-}1.40 \text{ cm año}^{-1}$ ) y LT02 ( $0.40\text{-}0.69 \text{ g cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$  y  $0.30\text{-}1.93 \text{ cm año}^{-1}$ ) presentan valores muy similares, contrario a los valores de LT03, que son menores ( $0.03\text{-}0.19 \text{ g cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$  y  $0.02\text{-}0.27 \text{ cm año}^{-1}$ ). Lo anterior coincide con el hecho de que LT01 y LT02 se ubican cerca de la desembocadura del Palizada, que es el río que suministra la mayor cantidad de agua dulce a LT ( $288 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ), así como una de las principales fuentes de sedimentos terrígenos hacia la laguna, mientras que LT03, está próximo a la desembocadura del río Candelaria ( $72 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) (Bach et al., 2005; Cuevas-Madrid et al., 2018).

### 7.2 Factor de enriquecimiento

Se utilizó al  $\text{Al}_2\text{O}_3$  como elemento normalizador, ya que el Al es un elemento conservativo (Green-Ruiz y Páez-Osuna, 2001); además, se identificó una correlación significativa positiva ( $p < 0.05$ ) con las fracciones finas de sedimento ( $< 63 \mu\text{m}$ ), que fueron las más abundantes en todas las secciones de los núcleos de sedimento ( $> 80\%$ ). Por otro lado, las concentraciones naturales (CN) de Al, Cr, Ni y Pb, se determinaron como el valor promedio de las secciones más profundas (i.e., 25-29 cm de profundidad) del núcleo LT03. En estas secciones del núcleo LT03, la actividad de  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  ya no fue detectable, por tanto, representan una edad  $> 100$  años (i.e., preindustrial). En la Tabla 6 se muestran los valores de la CN de los metales traza.

Tabla 9. Concentraciones naturales de Cr, Ni y Pb en los núcleos LT01, LT02 y LT03 de Laguna de Términos, Campeche.

	Cr ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )	Ni ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )	Pb ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)
Concentración Natural	275.13	146.08	8.24	12.21

Los factores de enriquecimiento (FE) de los tres núcleos se muestran en la Tabla 7. El metal con los mayores enriquecimientos fue Pb y su enriquecimiento más alto (FE = 3.57) se observó en LT02 a los 7.5 cm de profundidad. De acuerdo con la clasificación Essien et al. (2020), casi en su totalidad los sedimentos de LT01, LT02 y LT03 tienen enriquecimientos menores de Pb, con excepción de la sección 27-28 cm de LT03, que no presentó enriquecimiento y algunas secciones en LT02 (7-8 y 0-1 cm de profundidad), que mostraron un enriquecimiento moderado (FE: 3.57 y 3.05). Lo anterior, podría relacionarse a que estas secciones presentaron un mayor contenido de MO (14.8 y 15.6%), así como de limos (69.7 y 71.3%), además de una correlación significativa positiva ( $p < 0.05$ ) con el contenido de Pb, lo que indicaría la formación de complejos organo-metálicos en presencia de sedimentos finos. En cuanto a los FE de Cr, en general, los tres núcleos no se encuentran enriquecidos ( $EF < 1$ ), a excepción de algunas secciones donde los valores son ligeramente mayores a la unidad (i.e., 13-14 cm en LT02; 21-22 y 25-26 cm en LT03). Por otro lado, los FE de Ni presentan valores cercanos a la unidad y en ningún caso superiores a 1.5. Este comportamiento indica que la principal fuente de Cr y Ni es natural, mientras que para Pb la fuente de contaminantes es de origen antropogénico (Glasby y Szefer, 1998), siendo que los valores son más altos hacia las secciones superficiales. Lo anterior coincide con trabajos previos, que sugieren como la principal fuente de Cr y Ni hacia LT a la entrada de material litogénico, asociado a rocas máficas y ultramáficas (Cuevas-Madrid et al., 2018; Celis-Hernández et al., 2020). De igual forma, el enriquecimiento menor de Ni en los núcleos de sedimento podría estar relacionado a su presencia en la composición de petróleo, ya que si bien no se han encontrado evidencias claras de que sea una fuente importante en el área (Magallanes-Ordóñez et al., 2015; Celis-Hernández et al., 2020), existen distintos registros de derrames de petróleo.

Tabla 10. Factores de enriquecimiento de Cr, Ni y Pb en los núcleos LT01, LT02 y LT03 de Laguna de Términos, Campeche.

	Cr	Ni	Pb
LT01	0.57-0.90	0.80-1.46	1.09-2.93
LT02	0.62-1.02	0.95-1.19	1.39-3.57
LT03	0.72-1.07	0.86-1.19	0.93-2.91

### 7.3 Comparación del contenido de Cr, Ni y Pb en los núcleos LT con otros sitios costeros

En la Tabla 8 se enlistan las concentraciones reportadas de Cr, Ni y Pb en sedimentos de distintos sitios a nivel local, nacional e internacional. Las concentraciones de Pb obtenidas en este trabajo de investigación, son similares a los valores previamente reportados en el área por Macías-Zamora et al. (1998) con concentraciones de 0.22 a 20.2  $\mu\text{g g}^{-1}$ , Vázquez et al. (1999) con valores de 1.45 a 23.8  $\mu\text{g g}^{-1}$  y Rosas y Ponce (2004) con concentraciones entre 0.15 y 19.78  $\mu\text{g g}^{-1}$ . Asimismo De La Cruz-Landero et al. (2013), reportaron en sedimentos superficiales de LT concentraciones de Pb entre 9.00-16.05  $\mu\text{g g}^{-1}$ , similar a las reportadas por Magallanes-Ordóñez et al. (2015), de 3.6 a 13.7  $\mu\text{g g}^{-1}$ . Por el contrario, otros trabajos señalan contenidos de Pb menores, como Ponce-Vélez y Botello (1991), que determinaron valores promedio de 33.9  $\mu\text{g g}^{-1}$  en sedimentos superficiales, Cuevas-Madrid et al. (2018), con valores de 1.29 y 3.14  $\mu\text{g g}^{-1}$ , mientras que Ontiveros-Cuadras et al., (2022) reportaron contenidos de 3.5 a 5.2  $\mu\text{g g}^{-1}$ . Por el contrario, Gunn et al. (2012) observaron concentraciones muy altas de Pb en núcleos de sedimento (1.5-468.4  $\mu\text{g g}^{-1}$ ) y Celis-Hernández et al. (2020) en muestras superficiales (3.0 y 111.0  $\mu\text{g g}^{-1}$ ).

Las concentraciones de Ni en los núcleos LT fueron mayores en comparación con algunos valores previamente reportados en la zona; únicamente Magallanes-Ordóñez et al. (2015) y Rosas y Ponce (2004) reportaron intervalos similares (i.e., 13.5-164 y 12.66-133.39  $\mu\text{g g}^{-1}$ ). Por tanto, las concentraciones de Cr reportados por Ponce-Vélez y Botello (1991) (47.2  $\mu\text{g g}^{-1}$ ) y Ontiveros-Cuadras et al. (2022) (65-101  $\mu\text{g g}^{-1}$ ) fueron menores, mientras que Gunn et al. (2012) (1.5-468.4  $\mu\text{g g}^{-1}$ ), Cuevas-Madrid et al. (2018) (55.0-353.0) y Celis-Hernández et al. (2020) (57.0-289.0  $\mu\text{g g}^{-1}$ ) reportan concentraciones más altas.

A nivel nacional, en comparación con los valores encontrados en este trabajo, las concentraciones de Pb en el Estero de Urías y el Estuario de Coatzacoalcos son mayores (Ontiveros-Cuadras et al., 2019; Rosales-Hoz et al., 2003), estos valores se relacionaron a la industrialización y el crecimiento de desarrollos urbanos en la región. Mientras que, en

las lagunas Chelem, afectada por aguas residuales, y el sistema Xola-Paramán, una zona rural afectada por la agricultura, las concentraciones son menores (Arcega-Cabrera et al., 2014; Ontiveros-Cuadras et al., 2021). Por el contrario, la Laguna Salada, en donde se reportó contaminación por la construcción de la Planta Nuclear Laguna Verde, los valores son similares (Bojórquez-Sánchez et al., 2017). No obstante, los contenidos de Ni y Cr determinados en los sedimentos LT fueron mucho mayores a las que se reportaron en los anteriores trabajos mencionados.

A nivel internacional los valores de Pb fueron similares a los reportados en la laguna Homa, la cual se encuentra contaminada por aguas residuales agrícolas, industriales y domésticas ( $2.43-17.2 \mu\text{g g}^{-1}$ ; Uluturhan et al., 2011), pero mayores a los reportados para las lagunas Burullus en Egipto, que son afectadas por aguas residuales urbanas ( $8.22 \mu\text{g g}^{-1}$ , Chen et al., 2010) y la laguna San Rafael en Chile, clasificada como un sitio prístino ( $6.3-11.1 \mu\text{g g}^{-1}$ ; Ahumada y Rudolph, 2004). En comparación con las lagunas de Nador (Maanan et al., 2015) y Bizerte (Mna et al., 2017), los valores de Pb ( $15.6-326.2 \mu\text{g g}^{-1}$  y  $100-190 \mu\text{g g}^{-1}$ ) fueron menores, las cuales se encuentran afectadas por aguas residuales y actividades mineras, respectivamente, Por otro lado, las concentraciones de Cr y Ni en los núcleos LT son mayores a los reportados en los anteriores trabajos mencionados.

Por último, al comparar los contenidos de Cr, Ni y Pb con los valores propuestos por la NOAA (Buchman, 2008), TEL (nivel umbral de efectos) y PEL (nivel de efectos probables), por un lado, se identificó que los contenidos de Pb se encuentra por debajo de los dos límites; por otro lado, Cr sobrepasa los límites de TEL pero no los de PEL a excepción de una sección (LT01, 17-18 cm), es decir que mayormente se tiene en los sedimentos una concentración a partir de la cual se ha comenzado a observar una respuesta tóxica en los organismos bentónicos. Finalmente, Ni se encuentran por arriba tanto de TEL, como de PEL, por lo que las concentraciones se encuentran en niveles de efecto severo y representan un riesgo toxicológico para la biota del área.

Tabla 11. Concentraciones de Cr, Ni y Pb en sedimentos de distintos sitios a nivel local, nacional e internacional.

Sistema costero	Ambiente	Ni ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )	Cr ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )	Pb ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )	Referencia
Términos, Campeche	LC	92.83-160.76	118.63-292.10	6.89-19.16	Este estudio
Términos, Campeche	LC	50.9	47.2	33.9	Ponce-Vélez y Botello (1991)
Términos, Campeche	LC	46.1-117.8	28.9-126.1	1.5-468.4	Gunn et al. (2012)
Términos, Campeche	LC	31.00-82.00	-	9.00-16.05	De La Cruz-Landero et al. (2013)
Términos, Campeche	LC	13.5-164.0	-	3.6-13.7	Magallanes-Ordóñez et al. (2015)
Términos, Campeche	LC	4.22-22.44	55.00-353.00	1.29-3.14	Cuevas-Madrid et al. (2018)
Términos, Campeche	LC	15.0-96.0	57.0-289.0	3.0-111.0	Celis-Hernández et al. (2020)
Términos, Campeche	LC	9.4-33.7	65-101	3.0-5.3	Ontiveros-Cuadras et al. (2022)
Sonda de Campeche	PC	0.56-76.9	3.0-100.0	0.22-20.2	Macías-Zamora et al. (1998)
Pom-Atasta, Campeche	LC	36.1-116	13.7-125	1.45-23.8	Vázquez et al. (1999)
Palizada-del Este, Campeche	A	12.66-133.39	6.73-109.52	0.15-19.78	Rosas y Ponce (2004)
Candelaria-Panlau, Campeche	A	25.77-68.95	18.61 a 64.10	6.41-12.94	Rosas y Ponce (2004)
Coatzacoalcos, Veracruz	E	12.0-68.0	37-73	21-40	Rosales-Hoz et al. (2003)
Chelem, Yucatán	LC	7.1-14.3	21.5-41.6	0.1-13.5	Arcega-Cabrera et al. (2014)
Salada, Veracruz	LC	27.4-92.9	52.5-189.0	8.2-19.7	Bojórquez-Sánchez et al. (2017)
Estero de Urias, Mazatlán	Es	12.1-93.6	-	15.8-48.1	Ontiveros-Cuadras et al. (2019)
Xola-Paramán, Jalisco	LC	4.2-17.7	-	9.0-15.0	Ontiveros-Cuadras et al. (2021)
San Rafael, Chile	LC	21.0-26.9	58.0-63.0	6.3-11.1	Ahumada y Rudolph (2004)
Burullus, Egipto	LC	88.94	-	8.22	Chen et al. (2010)
Homa, Turquía	LC	58.1-108	83.9-129	2.43-17.2	Uluturhan et al. (2011)
Nador, Marruecos	LC	20.2-95.2	22.4-172.2	15.6-326.2	Maanan et al. (2015)
Bizerte, Tunisia	LC	52-88	155-210	100-190	Mna et al. (2017)
TEL		15.90	52.30	30,24	Buchman (2018)
PEL		42.80	160.00	112,00	Buchman (2018)

Laguna costera= LC; Plataforma continental=PC; Afluente=A; Estero=Es; Estuario=E.

#### 7.4 Flujos históricos de Cr, Ni y Pb

En el núcleo LT01 se observa un incremento en los flujos de los tres elementos (Pb, Ni y Cr) en  $1978 \pm 8.4$ , posteriormente hay un descenso para después mantenerse con valores homogéneos hasta  $1990 \pm 5$  en el caso de Ni ( $37.20 \mu\text{g cm}^{-2} \text{año}^{-1}$ ) y hasta  $1999 \pm 3$  en el caso de Cr y Pb ( $57.46$  y  $4.19 \mu\text{g cm}^{-2} \text{año}^{-1}$ ). Entre el  $2003 \pm 2$  y  $2005 \pm 2$  se identificó un nuevo pico, seguido de un descenso en el  $2008 \pm 2$ . En el caso de Ni y Cr comienza un nuevo

ascenso gradual que continua hasta las secciones más someras, con una única disminución drástica ( $55.31$  y  $69.77 \mu\text{g cm}^{-2} \text{año}^{-1}$ ) en el año  $2018 \pm 0.4$ . Para los flujos de Pb, se observa un comportamiento más errático desde el 2005 y hasta 2021 (Figura 30). En LT02 los comportamientos de Ni y Cr son muy similares siendo que mantienen flujos homogéneos desde  $1983 \pm 8$  ( $49.95$  y  $75.90 \mu\text{g cm}^{-2} \text{año}^{-1}$ ) y hasta  $2020 \pm 0.2$  ( $72.82$  y  $106.62 \mu\text{g cm}^{-2} \text{año}^{-1}$ ), en donde se ve un incremento, seguido de un descenso ( $52.83$  y  $64.58 \mu\text{g cm}^{-2} \text{año}^{-1}$ ) en el  $2021 \pm 0.1$ . Por su lado, los flujos de Pb comienzan a tener un ligero descenso desde  $1987 \pm 10$  y hasta el  $2002 \pm 5$ , para después aumentar y presentar un comportamiento errático (Figura 31). Finalmente, el núcleo LT03 presenta un comportamiento muy similar en los tres metales, con un aumento marcado entre  $1965 \pm 9$  (Ni:  $19.58$ , Cr:  $31.82$  y Pb:  $3.46 \mu\text{g cm}^{-2} \text{año}^{-1}$ ) y  $1972 \pm 8$  (Ni:  $20.59$ , Cr:  $29.59$  y Pb:  $2.85 \mu\text{g cm}^{-2} \text{año}^{-1}$ ), para luego disminuir a mediados de la década de los 1980s, seguido de un aumento gradual hasta el  $2020 \pm 0.1$ . En el caso de Cr, su flujo disminuye en la última sección y para Pb y Ni hay un descenso en el flujo durante el  $2020 \pm 0.1$  (Figura 32). El núcleo LT03 es el registro más antiguo e indicó un aumento en los flujos de los tres metales traza desde la década de los 1970s, que coincide con el asentamiento de la industria petrolera en el área, además de distintos derrames de petróleo como el derrame ocurrido el febrero de 1976 (Reyes-Gómez y Vázquez-Lule, 2009) y el derrame de Ixtoc I cerca de LT entre 1979 y 1980 (Cuevas-Madrid et al., 2018). Por otro lado, en LT02 el comportamiento de los flujos de Ni y Cr son muy similares, lo cual podría indicar que la fuente para ambos metales sea la misma; aunque los flujos de estos elementos en LT01, también muestran un comportamiento similar, se observaron algunas variaciones en sus tendencias históricas, que podrían estar relacionadas a una fuente adicional. En otros trabajos (i.e., Vázquez et al., 1999; de La Cruz-Landero et al., 2013) se ha relacionado la presencia de Pb, Ni y Cr en los sedimentos de la laguna con la descarga de aguas residuales y actividades antropogénicas en el área circundante y al interior de la laguna. Otra posible fuente, tanto de Cr como de Ni, es la litogénica transportada principalmente por el río Palizada (Magallanes-Ordóñez et al., 2015), en específico el complejo UM-M de Motzintla, el cual es un complejo volcánico-plutónico ubicado en el estado de Chiapas, que si bien, no presenta potencial económico para Ni o Cr, es una fuente importante, ya que se encuentra cercano al sistema Grijalva Usumacinta, el cual descarga sus aguas a LT (Ortíz-Hernández et al., 2006). Lo anterior, se ve reflejado en las magnitudes de los flujos de Ni y Cr, ya que estas son mucho mayores en los núcleos LT01 y LT02, los cuales se encuentran cercanos a la desembocadura del río Palizada.

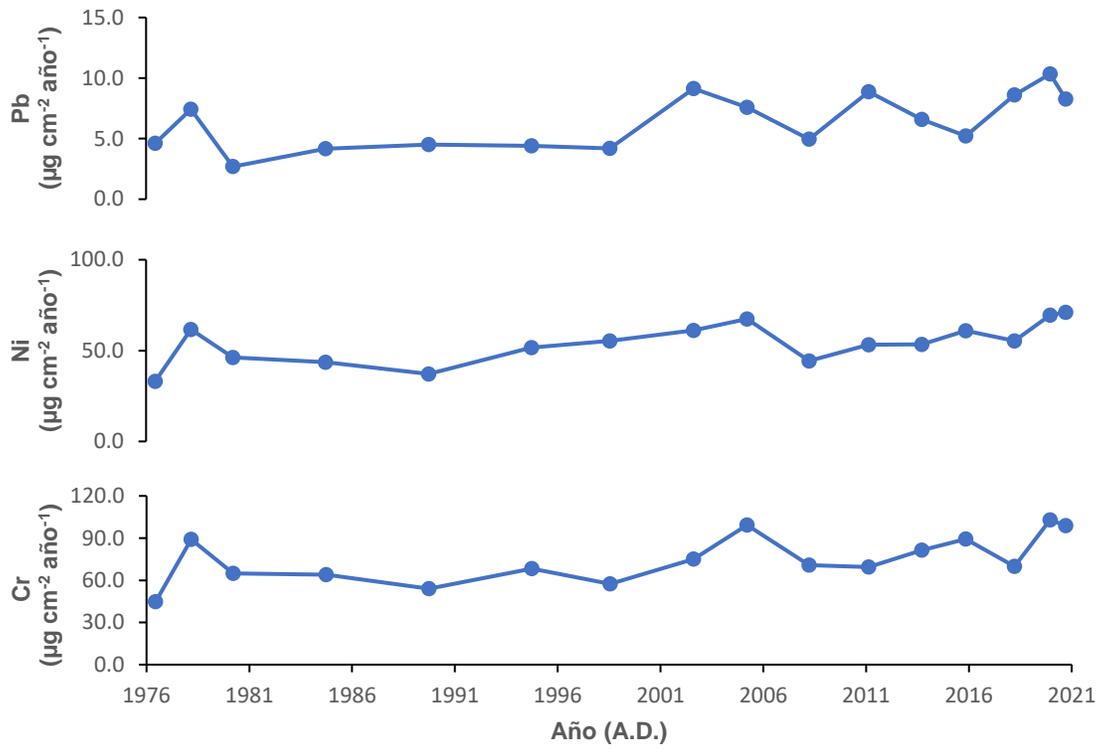


Figura 30. Flujos históricos de Pb, Ni y Cr en el núcleo LT01.

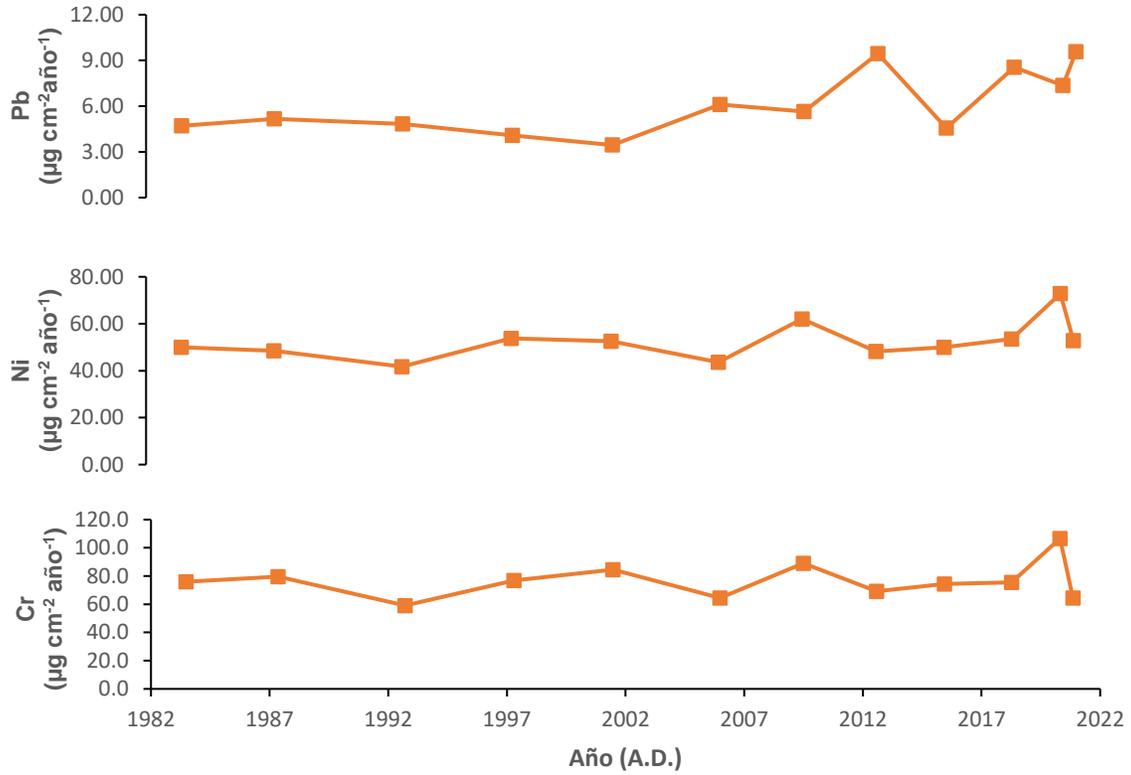


Figura 31. Flujos históricos de Pb, Ni y Cr en el núcleo LT02.

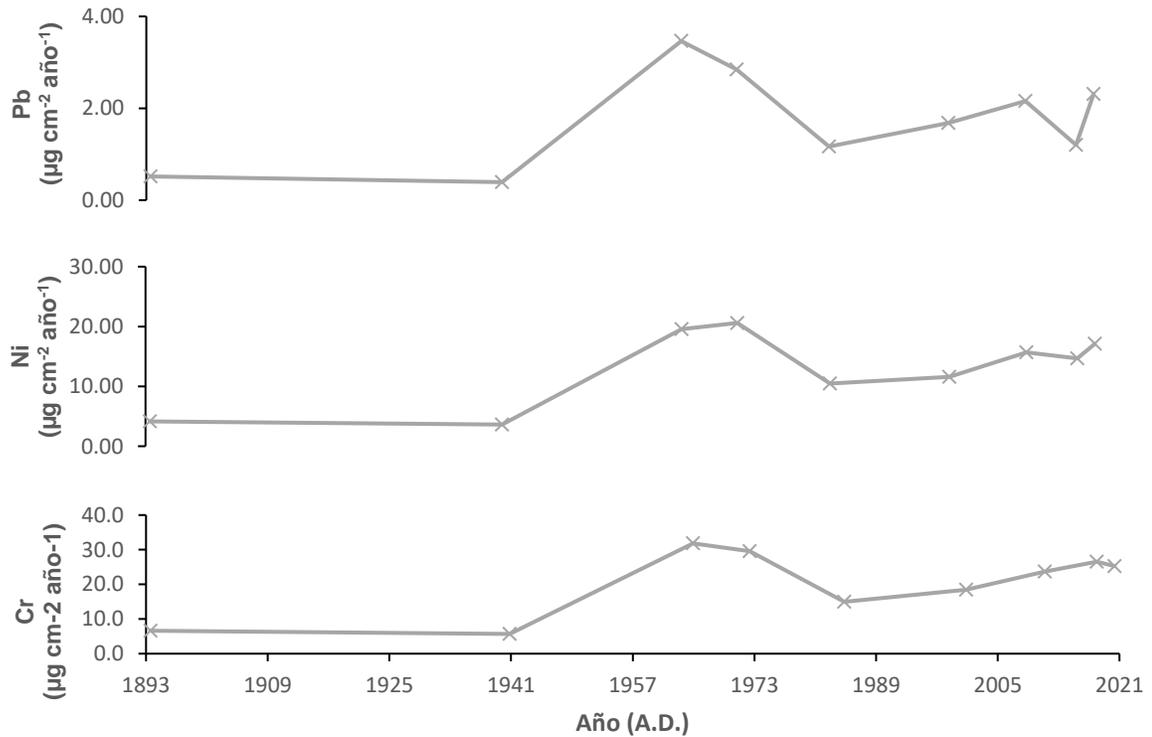


Figura 32. Flujos históricos de Pb, Ni y Cr en el núcleo LT03.

## 8. Conclusiones

La caracterización de los núcleos de sedimento LT01, LT02 y LT03, permitió establecer los contenidos de los metales traza Cr, Ni y Pb, determinar sus concentraciones naturales y los factores de enriquecimiento, así como reconstruir los cambios históricos de sus flujos, al interior de la Laguna de Términos (LT). De acuerdo con el fechado con  $^{210}\text{Pb}$ , las edades máximas para cada registro fueron:  $44\pm 9$  años en LT01,  $37\pm 13$  años en LT02 y  $106\pm 33$  años en LT03. Los valores de la TAS y TAM, fueron comparables en LT01 y LT02 (LT01:  $0.33\text{-}0.61\text{ g cm}^{-2}\text{ año}^{-1}$  y  $0.31\text{-}1.40\text{ cm año}^{-1}$ ; LT02:  $0.40\text{-}0.69\text{ g cm}^{-2}\text{ año}^{-1}$  y  $0.30\text{-}1.93\text{ cm año}^{-1}$ ), mientras que, en LT03, fueron menores ( $0.03\text{-}0.19\text{ g cm}^{-2}\text{ año}^{-1}$  y  $0.03\text{-}0.68\text{ cm año}^{-1}$ ); asimismo, se pudo observar en los tres núcleos un incremento en la TAS y la TAM hacia las secciones más recientes ( $\sim 2021\text{ A.D.}$ ).

En cuanto a la caracterización geoquímica de los sedimentos, el contenido de materia orgánica (MO) fue similar en los tres núcleos (11.2-17.5%), con perfiles que disminuyeron con el aumento en la profundidad del sedimento. Por otro lado, los contenidos de carbonatos (4.1-15.7%), tuvieron distintas distribuciones a lo largo de los núcleos: mientras en LT01 aumentaron hacia la base del registro, en LT02 no se observa una tendencia clara y en LT03 los carbonatos disminuyeron hacia las secciones más profundas. En los núcleos LT el tamaño de partícula predominante fue el limo con valores promedio entre 51.8 y 65.8%, seguido de las arcillas con valores de 26.8 a 38.0%.

Las concentraciones naturales obtenidas a partir de las secciones  $>100$  años fueron de  $8.24\text{ }\mu\text{g g}^{-1}$  para Pb,  $146.08\text{ }\mu\text{g g}^{-1}$  para Ni y  $275.13\text{ }\mu\text{g g}^{-1}$  para Cr. Los intervalos de concentración de los elementos mayores y metales traza fueron:  $\text{SiO}_2$ , 28.6-52.3%;  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 7.8-13.4%;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 3.4-5.3%;  $\text{TiO}_2$ , 0.32-0.64%;  $\text{MnO}$ , 0.05-0.07%; Pb, 6.89-19.16  $\mu\text{g g}^{-1}$ ; Ni, 92.83-160.76  $\mu\text{g g}^{-1}$ ; Cr, 118.63- 292.10  $\mu\text{g g}^{-1}$ . En la mayoría de las secciones de los núcleos, los factores de enriquecimiento mostraron que Cr no se encuentra enriquecido ( $\text{FE}<1$ ), Ni presentó enriquecimientos menores ( $\text{FE } 1\text{-}3$ ) y Pb enriquecimientos menores y solo en dos secciones (LT02: 7-8 y 0-1 cm de profundidad), un enriquecimiento moderado ( $\text{FE}= 3.57$  y  $3.05$ ). Al comparar las concentraciones obtenidas en este estudio de Cr, Ni y Pb, con los valores propuestos por la NOAA (i.e., TEL y PEL), se determinó que Pb se encuentra por debajo de los dos límites; Cr sobrepasa los límites de TEL más no los de PEL a excepción de una sección (LT01, 17-18 cm) y Ni se encuentra por arriba del PEL, y por lo tanto de TEL, por lo cual las concentraciones se encuentran en niveles de efecto severo y representan un riesgo toxicológico para la biota del área.

Los flujos de Pb (LT01 2.69-10.33  $\mu\text{g cm}^{-2} \text{año}^{-1}$ , LT02 3.45-9.58  $\mu\text{g cm}^{-2} \text{año}^{-1}$ , LT03 0.39-3.46  $\mu\text{g cm}^{-2} \text{año}^{-1}$ ), de Ni (LT01 33.10-71.19  $\mu\text{g cm}^{-2} \text{año}^{-1}$ , LT02 41.74-72.82  $\mu\text{g cm}^{-2} \text{año}^{-1}$ , LT03 3.62-20.59  $\mu\text{g cm}^{-2} \text{año}^{-1}$ ) y Cr (LT01 44.78-103.02  $\mu\text{g cm}^{-2} \text{año}^{-1}$ , LT02 59.13-106.62  $\mu\text{g cm}^{-2} \text{año}^{-1}$ , LT03 5.69-31.82  $\mu\text{g cm}^{-2} \text{año}^{-1}$ ), mostraron un aumento hacia las edades más recientes en los núcleos, lo cual indica una posible relación con la industrialización y el crecimiento urbano en el área. Además, se observa que el río Palizada es una fuente importante de metales traza en sedimentos.

## 9. Referencias

- Ahumada, R., & Rudolph, A. (2004). *Trace metals and other constitutive components in two sediment cores from a remote glacier-fed estuarine lagoon in southern Chile*. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 59(2), 231–236. doi:10.1016/j.ecss.2003.08.012
- Alloway, B.J. (ed.) (2013). *Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability*, *Environmental Pollution* 22, DOI 10.1007/978-94-007-4470-7, # Springer Science+Business Media Dordrecht 2013
- Alonzo, L. (2019, June 20). *La Sonda de Campeche produce el 66% de barriles de petróleo en el país*. *El Financiero*; *El Financiero*. [https://www.elfinanciero.com.mx/peninsula/la-sonda-de-campeche-produce-el-66-de-la-produccion-de-barriles-de-petroleo-en-el-pais/#:~:text=CAMPECHE.,Desarrollo%20Energ%C3%A9tico%20Sustentable%20\(Sedesu\)](https://www.elfinanciero.com.mx/peninsula/la-sonda-de-campeche-produce-el-66-de-la-produccion-de-barriles-de-petroleo-en-el-pais/#:~:text=CAMPECHE.,Desarrollo%20Energ%C3%A9tico%20Sustentable%20(Sedesu)).
- Amos, S., (1991). *The geology of North America, volumen J, The Gulf of México Basin*, Department of Geological Sciences, The University of Texas at Austin.
- Arcega-Cabrera, F., Garza-Pérez, R., Noreña-Barroso, E., & Ocegüera-Vargas, I. (2014). *Impacts of Geochemical and Environmental Factors on Seasonal Variation of Heavy Metals in a Coastal Lagoon Yucatan, Mexico*. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 94(1), 58–65. doi:10.1007/s00128-014-1416-1
- Bach, L., Calderon, R., Cepeda, M. F., Oczkowski, A., Olsen, S.B., Robadue, D. (2005). *Resumen del Perfil de Primer Nivel del Sitio Laguna de Términos y su Cuenca, México* Narragansett, RI: Coastal Resources Center, University of Rhode Island [https://www.crc.uri.edu/download/L1profile\\_MX\\_Final\\_Esp.pdf](https://www.crc.uri.edu/download/L1profile_MX_Final_Esp.pdf)
- Barrezueta-Unda, S., Cervantes-Alava, A., Ullauri-Espinoza, M., Barrera-Leon, J., & Condoy-Gorotiza, A. (2020). *Evaluación del método de ignición para determinar materia orgánica en suelos de la provincia el oro-ecuador*. *Fave Sección Ciencias Agrarias*, 19(2), 25–36. <https://doi.org/10.14409/fa.v19i2.9747>
- Bird, E. C. F. (1994). *Physical setting and geomorphology of coastal lagoons*. Pp. 9–39, In: B. Kjerfve (ed.), *Coastal lagoon processes*. Amsterdam: Elsevier
- Bojórquez-Sánchez, S., Marmolejo-Rodríguez, A. J., Ruiz-Fernández, A. C., Sánchez-González, A., Sánchez-Cabeza, J. A., Bojórquez-Leyva, H., & Pérez-Bernal, L. H. (2017). *Trace*

*element fluxes during the last 100 years in sediment near a nuclear power plant.* Estuarine, Coastal and Shelf Science, 198, 343–353. doi:10.1016/j.ecss.2017.05.005

Botello, A.V., Villanueva, S., y Martínez, E. (2015) *Metales y metaloides en praderas de pastos marinos de la laguna de Términos, Campeche*, p. 133-144 In: Ramos Miranda J., y G.J. Villalobos Zapata (editores), 2015. Aspectos socioambientales de la región de la laguna de Términos, Campeche. Universidad Autónoma de Campeche. 210 p. <https://epomex.uacam.mx/view/download?file=14/Aspectos%20Socioambientales%20de%20la%20Regio%CC%81n%20de%20la%20Laguna%20de%20Te%CC%81rminos%20.pdf&tipo=paginas>

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

Cardoso Vázquez, Edith Arlet, Sánchez Garrido, Eduardo y Rafael Hernández, José Antonio (2004). *Carta geológico-minera Campeche e 15-3 escala 1:250,000 estados de Campeche 2004*. Consejo De Recursos Minerales. Revisado el 10 de junio, 2022. [https://mapserver.sgm.gob.mx/InformesTecnicos/CartografiaWeb/T042004CAVE0001\\_01.PDF](https://mapserver.sgm.gob.mx/InformesTecnicos/CartografiaWeb/T042004CAVE0001_01.PDF)

Celis-Hernandez, O., Giron-Garcia, M. P., Ontiveros-Cuadras, J. F., Canales-Delgadillo, J. C., Pérez-Ceballos, R. Y., Ward, R. D., Merino-Ibarra, M. (2020). *Environmental risk of trace elements in mangrove ecosystems: An assessment of natural vs oil and urban inputs*. Science of The Total Environment, 138 643. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.138643

Celis-Hernández, Omar. (2006). *Estudio químico de sedimentos en el área inmediata al arrecife de la isla Sacrificios, Veracruz*. [Tesis de licenciatura] Universidad Nacional Autónoma de México. Cdmx, México.

Centro EPOMEX, (2001). '*Geología de la Laguna de Términos, Campeche*'. Extraído del proyecto N011: Actualización del Mapa de Uso del Suelo, Vegetación y Hábitats Críticos y Elaboración de una Base Cartográfica Digital del Área Protegida de la Laguna de Términos. Escala 1:250000. Centro EPOMEX. Financiado por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). México. D.F. [http://www.conabio.gob.mx/institucion/proyectos/resultados/N011\\_Cartografia.pdf](http://www.conabio.gob.mx/institucion/proyectos/resultados/N011_Cartografia.pdf)

- Cervantes-Zamora, Y., Cornejo-Olgín, S. L., Lucero-Márquez, R., Espinoza-Rodríguez, J. M., Miranda-Viquez, E. y Pineda-Velázquez, A, (1990). '*Provincias Fisiográficas de México*'. Extraído de Clasificación de Regiones Naturales de México II, IV.10.2. Atlas Nacional de México. Vol. II. Escala 1:4000000. Instituto de Geografía, UNAM. México. Catálogo de metadatos geográficos. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. [http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/rfisio4mgw.xml?\\_httpcache=yes&\\_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc\\_html.xsl&\\_indent=no](http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/rfisio4mgw.xml?_httpcache=yes&_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no)
- Chapman, P. M., Paine, M. D., Arthur, A. D., & Taylor, L. A. (1996). *A triad study of sediment quality associated with a major, relatively untreated marine sewage discharge*. Marine Pollution Bulletin, 32(1), 47–64. doi:10.1016/0025-326x(95)00108-y
- Chen, Z., Salem, A., Xu, Z., & Zhang, W. (2010). *Ecological implications of heavy metal concentrations in the sediments of Burullus Lagoon of Nile Delta, Egypt*. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 86(3), 491–498. doi:10.1016/j.ecss.2009.09.018
- Coll de Hurtado, A. (1975) *El suroeste de Campeche y sus recursos naturales*. Primera edición. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de geografía. D.F., México. <https://www.geografia.unam.mx/geoigg/biblioteca/archivos/memoria/20190910100945.pdf>
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (11 de noviembre de 2020). *Sitios Ramsar*. Revisado el 2 de junio 2022. <https://ramsar.conanp.gob.mx/index.php/sitios-ramsar/>
- Comisión Nacional del Agua (CNA), (1998). '*Cuencas Hidrológicas*'. Escala 1:250000. México. [http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/cue250kgw.xml?\\_httpcache=yes&\\_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc\\_html.xsl&\\_indent=no](http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/cue250kgw.xml?_httpcache=yes&_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no)
- CONABIO (2022). *SUR DE CAMPECHE*. [http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/rhp\\_095.html](http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/rhp_095.html)
- CONABIO. (2021). *La biodiversidad en Campeche: Estudio de Estado* | Biodiversidad Mexican. [https://www.biodiversidad.gob.mx/region/EEB/estudios/ee\\_campeche](https://www.biodiversidad.gob.mx/region/EEB/estudios/ee_campeche)
- Consultoría, gestoría ambiental y seguridad industrial (CEGASI) (2011). *Atlas de Peligros Naturales del Municipio de Carmen 2011*. SEDESOL. México. [http://www.carmen.gob.mx/transparencia/web/Ayuntamiento/2014/OB23/ATLAS\\_DE\\_PELIGROS\\_GROS\\_CARMEN\\_2011.pdf](http://www.carmen.gob.mx/transparencia/web/Ayuntamiento/2014/OB23/ATLAS_DE_PELIGROS_GROS_CARMEN_2011.pdf)

- Covarrubias, S.A., Cabriales, J.J.P., (2017), *Contaminación ambiental por metales pesados en México: problemática y estrategias de fitorremediación*, Revista Internacional de Contaminación Ambiental, Vol. 33, págs. 7-21.
- Cuevas-Madrid, H., Rosales Hoz, L., Márquez García, A. Z., & Carranza Edwards, A. (2018). *Environmental assessment of a mangrove protected area in the southeast Gulf of Mexico through sediment core analysis*. Environmental Earth Sciences, 77(3). doi:10.1007/s12665-017-7160-1
- De La Cruz-Landero, Nancy; Alderete Chávez, Ángel; Laffón Leal, Sandra (2013) *Acumulación de metales pesados en sedimentos del ecosistema manglar en laguna de Términos, Campeche, México*. Foresta Veracruzana, vol. 15, núm. 1, marzo-agosto, 2013, pp. 25-30 Recursos Genéticos Forestales Xalapa, México
- De Lacerda, L. D. (1994). Chapter 8 *Biogeochemistry of heavy Metals in Coastal Lagoons*. In: Kjerfve, B. (Ed.) Coastal Lagoon Processes, p. 221–241. Elsevier Oceanography Series, 60. [https://doi.org/10.1016/s0422-9894\(08\)70013-8](https://doi.org/10.1016/s0422-9894(08)70013-8)
- Dean, W. E. Jr., (1974). *Determination of carbonate and organic matter in calcareous sediments and sedimentary rocks by loss on ignition: Comparison with other methods*. J. Sed. Petrol. 44: 242–248.
- Duffus, J. H. (2002). “*Heavy metals*” a meaningless term? (IUPAC Technical Report). Pure and Applied Chemistry, 74(5), 793–807. doi:10.1351/pac200274050793
- Environmental Protection Agency. (2016) *Nickel compounds*. National Center for Environmental Assessment, Office of Research and Development, Washington, DC. US.
- Essien JP, Ikpe DI, Inam ED, Okon AO, Ebong GA, Benson NU (2022) *Occurrence and spatial distribution of heavy metals in landfill leachates and impacted freshwater ecosystem: An environmental and human health threat*. PLoS ONE 17(2): e0263279 (18) (PDF) Occurrence and spatial distribution of heavy metals in landfill leachates and impacted freshwater ecosystem: An environmental and human health threat. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0263279>
- Ethem Gonenc, and John P. Wolflin, (2004). *Coastal Lagoons: Ecosystem Processes and Modeling for Sustainable Use and Development*. CRC Press LLC, ProQuest Ebook Central, <http://ebookcentral.proquest.com/lib/unam/detail.action?docID=199036>.

- Folk, Robert L. (1980) *Petrology of Sedimentary Rocks*. Austin, Tex: Hemphill Pub. Co, Print.
- Fred B Phleger (2), Augustin Ayala-. (1971). *Processes and History of Terminos Lagoon, Mexico*. *AAPG Bulletin*, 55. doi:10.1306/819a3e26-16c5-11d7-8645000102c1865d
- García, E. - Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), (1998). 'Climas' (clasificación de Koppen, modificado por García). Escala 1:1000000. México. Catálogo de metadatos geográficos. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.  
[http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/clima1mgw.xml?\\_httpcache=yes&\\_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc\\_html.xsl&\\_indent=no](http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/clima1mgw.xml?_httpcache=yes&_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no)
- GLASBY, G., & SZEFER, P. (1998). *Marine pollution in Gdansk Bay, Puck Bay and the Vistula Lagoon, Poland: An overview*. *The Science of The Total Environment*, 212(1), 49–57. doi:10.1016/s0048-9697(97)00333-1
- Gómez-Reyes, E., A. Vázquez-Botello, J. Carriquiry, y R. Buddemeier, (1977). *Laguna de Términos, Campeche*. LOICZ. <http://data.ecology.su.se/MNODE/mexicanlagoons/ltbud.htm>
- Gonenc, Ethem, Wolflin, John P. (2004) *Coastal Lagoons Ecosystem Processes and Modeling for Sustainable Use and Development*. Boca Raton. CRC Press. p. 528
- Grajales-Nishimura, J. M., Cedillo-Pardo, E., Rosales-Domínguez, C., Morán-Zenteno, D. J., Alvarez, W., Claeys, P., Sánchez-Ríos, A. (2000). *Chicxulub impact: The origin of reservoir and seal facies in the southeastern Mexico oil fields*. *Geology*, 28(4), 307. doi:10.1130/0091-7613(2000)28<307:citoor>2.0.co;2
- Green-Ruiz, C., Páez-Osuna, F. (2001). *Heavy metal anomalies in lagoon sediments related to intensive agriculture in Altata-Ensenada del Pabellón coastal system (SE Gulf of California)*, *Environment International*, Volume 26, Issue 4, 2001, Pages 265-273, [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(00\)00116-1](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(00)00116-1).
- Gunn, Joel D., Folan, William J., Day, John W., & Faust, Betty B.. (2012). *Laguna de Términos/Río Candelaria Core: Conditions of Sustainable Urban Occupation in the Interior of the Yucatán Peninsula*. *Estudios de cultura maya*, 39, 67-97. Recuperado en 04 de enero de 2023, de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0185-25742012000100003&lng=es&tlng=en](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-25742012000100003&lng=es&tlng=en).

- Gutiérrez-Ruiz, M. E., Cenicerros-Gómez A., Luna-González, L., MoralesManilla, L. M., Romero, F., Martínez-Jardines, L. G., Rosas, H. y J. López Blanco. (2009). *Elaboración de un mapa regional de valores de fondo de elementos potencialmente tóxicos (EPT) de México*. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geografía. Informe final. SNIBCONABIO proyecto No. GS002. México, D.F.
- Heiri, O., Lotter, A.F. & Lemcke, G. (2001) *Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results*. Journal of Paleolimnology 25, 101–110. <https://doi.org/10.1023/A:1008119611481>
- Huertos, E.M.; y Romero, A.B. (2008) Conferencia: *Contaminación de suelos por metales pesados*. (macla. nº 10. noviembre-2008) Universidad de Sevilla. España. 22 p.
- INEGI (2001). *Conjunto de datos vectoriales Fisiográficos. Continuo Nacional. Subprovincias fisiográficas*, escala 1:1 000 000. Serie I. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267599>
- INEGI, (01/06/2018). '*Áreas Geoestadísticas Municipales, Junio 2018.*', escala: 1:250000. edición: 1. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, México. Catálogo de metadatos geográficos. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. [http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/muni\\_2018gw.xml?\\_httpcache%20=%20yes&\\_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc\\_html.xsl&\\_indent%20=%20no](http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/muni_2018gw.xml?_httpcache%20=%20yes&_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&_indent%20=%20no)
- INEGI, (2016b). '*División política estatal 1:250000. 2015*', escala: 1:250 000. edición: 2015. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.. Obtenido de Cartografía geoestadística urbana y rural amanzanada. Cierre de la Encuesta Intercensal 2015.. Aguascalientes, México. Catálogo de metadatos geográficos. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad [http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/dest\\_2015gw.xml?\\_httpcache=yes&\\_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc\\_html.xsl&\\_indent=no](http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/dest_2015gw.xml?_httpcache=yes&_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no)
- INEGI. (2001) *Conjunto de datos vectoriales Fisiográficos. Continuo Nacional. Provincias fisiográficas*, escala: 1:1 000 000. Serie I. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267575>
- INEGI. (2020b). *¿Cuántos habitantes tiene... - Censo de Población y Vivienda 2020*. <https://www.inegi.org.mx/app/cpv/2020/resultadosrapidos/default.html?texto=ciudad%20de%20carmen%20campeche>

INEGI. *Resumen. Campeche.* (2020c). Revisado el 1 de junio 2022. <https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/camp/default.aspx?tema=me&e=04>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (México)(2017). *Anuario estadístico y geográfico de Campeche 2017* / Instituto Nacional de Estadística y Geografía.-- México :INEGI. [https://www.inegi.org.mx/contenido/productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva\\_estruc/anuarios\\_2017/702825095109.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenido/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/anuarios_2017/702825095109.pdf)

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (México)(2018). *Aspectos geográficos Campeche* / Instituto Nacional de Estadística y Geografía.-- México : INEGI. [https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/areasgeograficas/resumen/resumen\\_04.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/areasgeograficas/resumen/resumen_04.pdf)

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (México)(2020a). *Anuario estadístico y geográfico por entidad federativa 2020* / Instituto Nacional de Estadística y Geografía.—México :INEGI. [https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva\\_estruc/702825197513.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825197513.pdf)

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (México). (2016a). *Estudio de información integrada de la Cuenca Laguna de Términos y otras.* Instituto Nacional de Estadística y Geografía.-- México : INEGI. [https://www.inegi.org.mx/contenido/productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva\\_estruc/702825087456\\_1.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenido/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825087456_1.pdf)

Kjerfve, B. (1994) *Coastal Lagoons*. In: Kjerfve, B. (Ed.) *Coastal Lagoon Processes*. p. 1-8, Elsevier Oceanography Series, 60. [https://doi.org/10.1016/S0422-9894\(08\)70006-0](https://doi.org/10.1016/S0422-9894(08)70006-0).

Kjerfve, B. and Magill, K.E., 1989. *Geographic and hydrodynamic characteristics of shallow coastal lagoons*. In: L.G. Ward and G.M. Ashley (Editors), *Physical Processes and Sedimentology of Siliciclastic-Dominated Lagoonal Systems*. Mar. Geol., 88: 187-199.

Lankford R., R., 1977. *Coastal lagoons of Mexico. Their origin and classification. (Lagunas costeras de México. Su origen y clasificación)*. En: WILEY (ed.). *Estuarine Processes*. 2: 182-215. Academic Press. <https://es.lat1lib.vip/book/2368171/031ff6?signAll=1&ts=0104>

Lara-Domínguez, A., Contreras, F., Castañeda, O., Barba, E. y Pérez, M. (2011). *Lagunas costeras y estuarios. La Biodiversidad en Veracruz un estudio de estado*. Primera edición. CONABIO. [https://www.researchgate.net/publication/234004458\\_Lagunas\\_costeras\\_y\\_estuarios](https://www.researchgate.net/publication/234004458_Lagunas_costeras_y_estuarios).

- Laserre, P. (1979), "Coastal lagoons: sanctuary ecosystems, cradles of culture, targets for economic growth", *Nature and Resources*, vol. 15, no. 4, pp. 2-21.
- Leeder, 1982 M.R. Leeder *Sedimentology: Process and Product*. George Allen & Unwin, London  
<https://doi.org/10.1007/978-94-009-5986-6>
- Londoño, L.F.F., Londoño, M.P.T., Muñoz, F.G.G., (2016), *Risk of heavy metals in human and animal health*, *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, Vol 14, págs.145-153
- López R. E. (1979) *Geología de México*, Tomo III.  
[https://mapserver.sgm.gob.mx/InformesTecnicos/CartografiaWeb/T042004MIHA0001\\_01.PDF](https://mapserver.sgm.gob.mx/InformesTecnicos/CartografiaWeb/T042004MIHA0001_01.PDF)
- Maanan, M., Saddik, M., Maanan, M., Chaibi, M., Assobhei, O., & Zourarah, B. (2015). *Environmental and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Nador lagoon, Morocco*. *Ecological Indicators*, 48, 616–626.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.09.034>
- Macías-Zamora, J. V., Villaescusa-Celaya, J. A., Muñoz-Barbosa, A., & Gold-Bouchot, G. (1999). *Trace metals in sediment cores from the Campeche shelf, Gulf of Mexico*. *Environmental Pollution*, 104(1), 69–77. doi:10.1016/s0269-7491(98)00153-5
- Magallanes-Ordóñez, V. R., Marmolejo-Rodríguez, A. J., Rodríguez-Figueroa, G. M., Sánchez-González, A., Aguíñiga-García, S., Arreguín-Sánchez, F., Zetina-Rejón, M., Tripp-Valdez, A., & Romo-Ríos, J. A. (2015). *Characterization of lithogenic and biogenic zones and natural enrichment of nickel in sediments of the Terminos Lagoon, Campeche, Mexico*. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 156, 116–123. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2014.11.007>
- Martin, L., & Landim Dominguez, J. M. (1994). Chapter 3 *Geological History of Coastal Lagoons*. *Coastal Lagoon Processes*, 41–68. [https://doi.org/10.1016/s0422-9894\(08\)70008-4](https://doi.org/10.1016/s0422-9894(08)70008-4)
- Michael J. Kennish, Hans W. Paerl (editores) (2010) *Coastal lagoons: critical habitats of environmental change* Taylor & Francis, Londres. p. 568.
- Miranda Huerta, Alfonso, Escamilla de La Rosa, José E., Gama Lagunas, Julio, Sánchez Ramírez, David y Aguilera M., Miguel Angel. (2004). *Carta geológico-minera Ciudad Del Carmen E15-6 escala 1:250,000 estados de Campeche y Tabasco 2004* Consejo De Recursos Minerales. Revisado el 9 de junio, 2022.

[https://mapserver.sgm.gob.mx/InformesTecnicos/CartografiaWeb/T042004MIHA0001\\_01.PDF](https://mapserver.sgm.gob.mx/InformesTecnicos/CartografiaWeb/T042004MIHA0001_01.PDF)

Miranda Huerta, Alfonso, Escamilla de la Rosa, José Ezequiel y Gama Lagunas, Julio (2005). *Carta Geológico-minera Ciudad del Carmen E15-6. Campeche y Tabasco*. Servicio Geológico Mexicano. Revisado el 10 de junio, 2022. [https://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas\\_Online/geologia/112\\_E15-6\\_GM.pdf](https://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas_Online/geologia/112_E15-6_GM.pdf)

Mna, H. B., Oueslati, W., Helali, M. A., Zaaboub, N., Added, A., & Aleya, L. (2017). *Distribution and assessment of heavy metal toxicity in sediment cores from Bizerte Lagoon, Tunisia*. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(7). doi:10.1007/s10661-017-6073-5

NASA/METI/AIST/Japan Space Systems, and U.S./Japan ASTER Science Team. *ASTER global digital elevation model V003, 2018*, distributed by NASA EOSDIS Land Processes DAAC. <https://doi.org/10.5067/ASTER/ASTGTM.003>.

Nichols, M.M. , Boon III, J.D. (1994). Chapter 7 *Sediment Transport Processes in Coastal Lagoons* In: Kjerfve, B. (Ed.) *Coastal Lagoon Processes*. p. 157-219, Elsevier Oceanography Series, 60. [https://doi.org/10.1016/S0422-9894\(08\)70006-0](https://doi.org/10.1016/S0422-9894(08)70006-0).

Norma-147-SEMARNAT/SSA1-2004. Diario Oficial, Segunda edición. 8 p.

Ontiveros-Cuadras, J.F. (2015). *Estudio retrospectivo de las tendencias históricas de los flujos de elementos potencialmente tóxicos (As, Cr, Cu, Hg, Pb, Rb, Zn, V), contaminantes orgánicos persistentes (PCBs, PBDEs y PAHs) y de carbono orgánico, en dos lagos ubicados en el Altiplano Mexicano, caracterizados por niveles de antropización contrastantes*. Tesis de doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México, México. <http://132.248.9.195/ptd2015/febrero/0725191/Index.html>

Ontiveros-Cuadras, J. F., Ruiz-Fernández, A. C., Pérez-Bernal, L. H., Serrato de la Peña, J. L., & Sánchez-Cabeza, J.-A. (2019). *Recent trace metal enrichment and sediment quality assessment in an anthropized coastal lagoon (SE Gulf of California) from 210Pb-dated sediment cores*. *Marine Pollution Bulletin*, 149, 110653. doi:10.1016/j.marpolbul.2019.110653

Ontiveros-Cuadras, J. F., Ruiz-Fernández, A. C., Pérez-Bernal, L. H., Raygoza-Viera, J. R., & Sánchez-Cabeza, J.-A. (2021). *Historical reconstruction of trace element concentrations and fluxes in a tropical coastal lagoon (Mexican Pacific) derived from 210Pb radiochronology*. *Continental Shelf Research*, 213, 104315. doi:10.1016/j.csr.2020.104315

- Ontiveros-Cuadras, J. F., Ruiz-Fernández, A. C., Pérez-Bernal, L. H., Santiago-Pérez, S., González y González, S., Ávila, E., Cardoso-Mohedano, J. G., & Sánchez-Cabeza, J.-A. (2022). *Accumulation and fluxes of potentially toxic elements in a large coastal lagoon (southern Gulf of Mexico) from <sup>210</sup>Pb sediment chronologies*. *Marine Pollution Bulletin*, 181, 113839. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113839>
- Ortíz-Hernández L.E., Escamilla-Casas J.S., Flores-Castro K., Ramírez-Cardona M., Acevedo-Sandoval O. 2006. *Características geológicas y potencial metalogenético de los principales complejos ultramáficos-máficos de México*. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. Tomo LVII, Núm. 4, 2006, p. 161-181
- Osuna-López J.I., Ortega-Romero P. y Páez-Osuna F. (1986). *Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb y Zn en los sedimentos del puerto y antepuerto de Mazatlán*. *Ciencias Marinas* 12,35. 45.
- Padilla y Sánchez, Ricardo José. (2007). *Evolución geológica del sureste mexicano desde el Mesozoico al presente en el contexto regional del Golfo de México*. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 59(1), 19-42. <https://doi.org/10.18268/bsgm2007v59n1a3>
- Páez-Osuna, F., (2005a). *Efectos de los metales*, p. 343-360. In: A. V. Botello, J. Rendón-von Osten, G. Gold-Bouchot y C. Agraz-Hernández (Eds.). *Golfo de México Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y Tendencias*, 2da Edición. Univ. Autón. de Campeche, Univ. Autón. de Campeche, Univ. Nal. Autón. de México, Instituto Nacional de Ecología. 696 p.
- Páez-Osuna, F., (2005b). *Fuentes de metales en la zona costera marina*, p. 329-342. In: A. V. Botello, J. Rendón-von Osten, G. Gold-Bouchot y C. Agraz-Hernández (Eds.). *Golfo de México Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y Tendencias*, 2da Edición. Univ. Autón. de Campeche, Univ. Nal. Autón. de México, Instituto Nacional de Ecología. 696 p.
- Piñeiro Ramírez, F. (2007) *INVENTARIO FÍSICO DE LOS RECURSOS MINERALES DEL MUNICIPIO PALIZADA, ESTADO DE CAMPECHE*. SGM, Fideicomiso de fomento minero. México. [https://mapserver.sgm.gob.mx/InformesTecnicos/InventariosMinerosWeb/T0407PI\\_RF0003\\_01.PDF](https://mapserver.sgm.gob.mx/InformesTecnicos/InventariosMinerosWeb/T0407PI_RF0003_01.PDF)
- Ponce-Velez, G., & Botello, A. V. (1991). *Aspectos geoquímicos y de contaminación por metales pesados en la Laguna de Términos, Campeche*. *HIDROBIOLÓGICA*, 1(2), 1-10. Recuperado a partir de [:https://hidrobiologica.izt.uam.mx/index.php/revHidro/article/view/526](https://hidrobiologica.izt.uam.mx/index.php/revHidro/article/view/526)

- Ramos Miranda J., y G.J. Villalobos Zapata (editores), 2015. *Aspectos socioambientales de la región de la laguna de Términos, Campeche*. Universidad Autónoma de Campeche. 210 p. <https://epomex.uacam.mx/view/download?file=14/Aspectos%20Socioambientales%20de%20la%20Regio%CC%81n%20de%20la%20Laguna%20de%20Te%CC%81rminos%20.pdf&tipo=paginas>
- Ramsar (2016). *Introducción a la Convención sobre los Humedales*, Secretaría de la Convención de Ramsar, Gland, Suiza.
- Ramsar (2022). *Área de Protección de Flora y Fauna Laguna de Términos | Servicio de Información sobre Sitios Ramsar*. <https://rsis.ramsar.org/es/ris/1356?language=es>
- Reyes-Gómez, H. G. y A. D. Vázquez-Lule, (2009). *Caracterización del sitio de manglar Isla Aguada – Boca de Pargos*, en Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).. Sitios de manglar con relevancia biológica y con necesidades de rehabilitación ecológica. CONABIO, México, D.F. [http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/manglares/doctos/caracterizacion/PY62\\_Isla\\_Aguada\\_Boca\\_de\\_Pargos\\_caracterizacion.pdf](http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/manglares/doctos/caracterizacion/PY62_Isla_Aguada_Boca_de_Pargos_caracterizacion.pdf)
- Robbins, J.A. (1978). *Geochemical and geophysical applications of radioactive lead isotopes*. Nriagu, J.O. (Ed.), *Biochemistry of Lead*, Elsevier, Amsterdam, 85-393.
- Rosales-Hoz, L., Cundy, A. B., & Bahena-Manjarrez, J. L. (2003). *Heavy metals in sediment cores from a tropical estuary affected by anthropogenic discharges: Coatzacoalcos estuary, Mexico*. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 58(1), 117–126. doi:10.1016/s0272-7714(03)00066-0
- Rosas Gutiérrez, Bernarda Alba (2004). *Evaluación de metales pesados en sedimentos y organismos de las lagunas costeras de Veracruz, Tabasco y Campeche, México*. [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México]. eTESIUNAM.
- Saccà, Alessandro. (2016). Chapter: 1 *Confined coastal lagoons Extraordinary habitats at risk*. In: Snyder, C. (Ed.) *Coastal Lagoons - Geology, Characteristics and Diversity*, p. 1-24. Nova Science Publishers, Inc.
- Salomons, W. and Förstner, U. (1984) *Metals in the Hydrocycle*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-69325-0>

- Sánchez-Cabeza, J.A., Díaz-Asencio, M., Ruiz-Fernández, A. C. (2012). *Radiocronología de sedimentos costeros utilizando  $^{210}\text{Pb}$ : Modelos, validación y aplicaciones*. Organismo internacional de energía atómica. Viena. 1-118. [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1538\\_S\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1538_S_web.pdf)
- Sánchez-Cabeza, J.A., Ruiz-Fernández, A.C. (2012).  $^{210}\text{Pb}$  *sediment radiochronology: An integrated formulation and classification of dating models*. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 82, 183-200.
- SEMARNAP.(1997). *Programa de Manejo del Área de Protección de Flora y Fauna "Laguna de Términos"*. 167 pp. [https://simec.conanp.gob.mx/pdf\\_libro\\_pm/118\\_libro\\_pm.pdf](https://simec.conanp.gob.mx/pdf_libro_pm/118_libro_pm.pdf)
- Servicio geológico mexicano. (diciembre 2020) *Panorama minero del estado de Campeche*. Secretaría de Economía, subsecretaría de minería. Dirección de investigación y desarrollo. México. Pp 35. <http://www.sgm.gob.mx/pdfs/CAMPECHE.pdf>
- Solomons, W. and Förstner, U. (1984) *Metals in the Hydrocycle*. Springer Verlag, Berlin, 349 p.
- Sutherland, R. A. (2000). *Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii*. *Environmental Geology*, 39(6), 611–627. doi:10.1007/s002540050473
- The Secretariat of the Convention on Wetlands. *The List of Wetlands of International Importance*. (8 de junio 2022). <https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/sitelist.pdf>
- Uluturhan, E., Kontas, A., & Can, E. (2011). *Sediment concentrations of heavy metals in the Homa Lagoon (Eastern Aegean Sea): Assessment of contamination and ecological risks*. *Marine Pollution Bulletin*, 62(9), 1989–1997. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.06.019>
- Vázquez, G. (1999). *Metal ions in water and sediments of the Pom-Atasta Lagoon, Mexico*. *Environment International*, 25(5), 599–604. doi:10.1016/s0160-4120(99)00038-0
- Venegas Pérez, Ysmael (13 de diciembre 2003.). *Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar*. Ramsar. <https://rsis.ramsar.org/RISapp/files/RISrep/MX1356RIS.pdf?language=es>
- Villalobos-Zapata, G. J., y J. Mendoza Vega (Coord.), 2010. *La Biodiversidad Campeche: Estudio de Estado*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (conabio), Gobierno del Estado de Campeche, Universidad Autónoma de Campeche, El Colegio de la Frontera Sur. México. 730 p. <https://www.cbd.int/doc/nbsap/study/mx-study-campeche-es.pdf>

Volke-Sepúlveda, T., Velasco-Trejo, J. A., & De la Rosa-Pérez, D. A. (2005). *Suelos contaminados por metales pesados y metaloides*. México: INE-Semarnat.

Walter E. Dean, Jr. (1974). *Determination of Carbonate and Organic Matter in Calcareous Sediments and Sedimentary Rocks by Loss on Ignition: Comparison With Other Methods*. SEPM Journal of Sedimentary Research, Vol. 44. <https://doi.org/10.1306/74D729D2-2B21-11D7-8648000102C1865D>

YÁÑEZ, C. A., Bol. Soc. Geol. Méx., *Procesos costeros y sedimentos recientes de la plataforma continental al sur de la Bahía de Campeche*, México.1971.75-116.32.  
<http://boletinsgm.igeolcu.unam.mx/bsgm/vols/epoca03/3202/1969-32-2%20Yanez.pdf>

## 10. Anexos

**Anexo 1 Tabla de concentración de Carbono orgánico e inorgánico núcleo LT01.**

Profundidad (cm)	Peso Muestra (~1.5 g)	Masa perdida materia orgánica (g) 550°C	Pérdida de materia orgánica (%)	Masa perdida carbonatos (g) 950°C	% Pérdida de muestra de carbonatos	Pérdida total (%)
0-1	1.5018	0.24	16.14	0.16	10.8736	27.01
1-2	1.5010	0.26	17.3	0.14	9.1206	26.42
3-4	1.5004	0.22	14.99	0.16	10.7838	25.77
5-6	1.5016	0.22	14.94	0.16	10.8418	25.79
7-8	1.5020	0.22	14.93	0.17	11.3981	26.33
9-10	1.5012	0.22	14.73	0.17	11.4508	26.19
11-12	1.5009	0.22	14.56	0.17	11.18	25.74
13-14	1.5002	0.22	14.47	0.17	11.4651	25.94
15-16	1.5025	0.21	13.99	0.19	12.4193	26.41
17-18	1.5007	0.22	14.73	0.16	10.9282	25.66
19-20	1.5031	0.21	13.95	0.18	11.8555	25.81
21-22	1.5017	0.21	13.76	0.18	11.8532	25.61
23-24	1.5007	0.21	13.86	0.17	11.1615	25.02
25-26	1.5012	0.19	12.83	0.19	12.8497	25.68
26-27	1.5023	0.18	12.1	0.20	13.5126	25.61
27-28	1.5007	0.17	11.23	0.21	14.2533	25.49
Promedio		0.21	14.28	0.17	11.62	25.91
Máximo		0.26	17.30	0.21	14.25	27.01
Mínimo		0.17	11.23	0.14	9.12	25.02

**Anexo 2 Tabla de concentración de Carbono orgánico e inorgánico núcleo LT02.**

Profundidad (cm)	Peso Muestra (~1.5 g)	Masa perdida materia orgánica (g) 550°C	Pérdida de materia orgánica (%)	Masa perdida carbonatos (g) 950°C	% Pérdida de muestra de carbonatos	Pérdida total (%)
0-1	1.5026	0.24	15.65	0.19	12.62	28.27
1-2	1.5	0.21	13.69	0.22	14.43	28.12
3-4	1.5028	0.23	15.58	0.20	13.38	28.97
5-6	1.5015	0.21	14.31	0.22	14.47	28.77
7-8	1.5007	0.22	14.87	0.20	13.33	28.2
9-10	1.5012	0.22	14.50	0.20	13.18	27.68
11-12	1.5022	0.18	12.12	0.23	15.28	27.4
13-14	1.5084	0.20	13.58	0.21	13.92	27.51
15-16	1.5063	0.22	14.89	0.18	11.81	26.7
17-18	1.5045	0.19	12.89	0.20	13.27	26.16
19-20	1.5045	0.19	12.77	0.21	14.13	26.9
21-22	1.5013	0.17	11.40	0.23	15.52	26.92
22-23	1.5011	0.20	13.15	0.22	14.38	27.53
Promedio		0.21	13.80	0.21	13.83	27.62
Máximo		0.24	15.65	0.23	15.52	28.97
Mínimo		0.17	11.40	0.18	11.81	26.16

**Anexo 3 Tabla de concentración de Carbono orgánico e inorgánico núcleo LT03.**

Profundidad (cm)	Peso Muestra (~1.5 g)	Masa perdida materia orgánica (g) 550°C	Pérdida de materia orgánica (%)	Masa perdida carbonatos (g) 950°C	% Pérdida de muestra de carbonatos	Pérdida total (%)
0-1	1.5086	0.25	16.68	0.19	12.53	29.21
1-2	1.4994	0.25	16.49	0.17	11.23	27.72
3-4	1.5068	0.26	17.54	0.15	10.18	27.72
5-6	1.5066	0.25	16.74	0.16	10.55	27.29
7-8	1.5040	0.26	17.13	0.14	9.06	26.19
9-10	1.5015	0.23	15.58	0.15	9.96	25.54
11-12	1.5030	0.23	15.20	0.15	9.91	25.12
13-14	1.5020	0.23	15.32	0.14	9.08	24.40
15-16	1.5064	0.23	15.42	0.12	8.01	23.43
17-18	1.5004	0.23	15.17	0.10	6.80	21.97
19-20	1.5077	0.20	13.34	0.11	7.61	20.95
21-22	1.5038	0.21	14.17	0.13	8.54	22.71
23-24	1.4963	0.20	13.08	0.11	7.43	20.51
25-26	1.5009	0.23	15.20	0.08	5.49	20.69
27-28	1.5013	0.22	14.45	0.06	4.14	18.58
28-29	1.5065	0.21	14.01	0.08	5.30	19.30
Promedio		0.23	15.35	0.13	8.49	23.83
Máximo		0.26	17.54	0.19	12.53	29.21
Mínimo		0.20	13.08	0.06	4.14	18.58

**Anexo 4 Distribución del tamaño de grano (%) para arcillas (< 3.9 µm), limos (3.9-63 µm) y arenas (> 63 µm) en el núcleo de sedimento LT01.**

Profundidad	Arenas (%)	u	Limos (%)	u	Arcillas (%)	u
0-1	1.74	0.03	68.38	1.25	29.88	0.82
1-2	2.06	0.03	67.48	1.23	30.46	0.84
3-4	2.10	0.03	72.07	1.31	25.84	0.71
5-6	8.82	0.13	68.11	1.24	23.07	0.63
7-8	5.28	0.08	68.27	1.24	26.45	0.73
9-10	5.90	0.09	68.13	1.24	25.97	0.71
11-12	6.85	0.10	66.80	1.22	26.35	0.72
13-14	8.94	0.13	65.81	1.20	25.24	0.69
15-16	11.28	0.16	63.38	1.16	25.34	0.70
17-18	4.19	0.06	68.27	1.24	27.54	0.76
19-20	11.38	0.16	62.07	1.13	26.55	0.73
21-22	4.49	0.06	65.42	1.19	30.09	0.83
23-24	4.64	0.07	67.83	1.24	27.53	0.76
25-26	21.70	0.31	54.15	0.99	24.15	0.66
27-28	10.98	0.16	61.24	1.12	27.78	0.76
Promedio	7.36		65.83		26.82	
Máximo	21.70		72.07		30.46	
Mínimo	1.74		54.15		23.07	

**Anexo 5 Distribución del tamaño de grano (%) para arcillas (< 3.9 µm), limos (3.9-63 µm) y arenas (> 63 µm) en el núcleo de sedimento LT02.**

Profundidad	Arenas (%)	u	Limos (%)	u	Arcillas (%)	u
0-1	1.19	0.02	71.39	1.30	27.42	0.75
1-2	1.59	0.02	71.68	1.31	26.73	0.73
3-4	3.56	0.05	69.09	1.26	27.35	0.75
5-6	7.54	0.11	66.43	1.21	26.03	0.72
7-8	2.49	0.04	69.71	1.27	27.81	0.76
9-10	2.91	0.04	68.89	1.26	28.21	0.77
11-12	4.79	0.07	67.94	1.24	27.26	0.75
13-14	4.05	0.06	68.75	1.25	27.20	0.75
15-16	4.42	0.06	67.56	1.23	28.02	0.77
17-18	5.40	0.08	68.56	1.25	26.04	0.72
19-20	8.32	0.12	64.01	1.17	27.68	0.76
21-22	4.26	0.06	66.94	1.22	28.80	0.79
22-23	5.50	0.08	68.09	1.24	26.41	0.73
Promedio	4.31		68.39		27.30	
Máximo	8.32		71.68		28.80	
Mínimo	1.19		64.01		26.03	

**Anexo 6 Distribución del tamaño de grano (%) para arcillas (< 3.9 µm), limos (3.9-63 µm) y arenas (> 63 µm) en el núcleo de sedimento LT03.**

Profundidad	Arenas (%)	u	Limos (%)	u	Arcillas (%)	u
0-1	8.32	0.12	54.91	1.00	36.77	1.01
1-2	16.03	0.23	48.41	0.88	35.57	0.98
3-4	12.84	0.19	51.59	0.94	35.57	0.98
5-6	14.90	0.21	47.84	0.87	37.26	1.02
7-8	13.40	0.19	59.68	1.09	26.92	0.74
9-10	9.52	0.14	48.80	0.89	41.68	1.15
11-12	12.84	0.19	51.31	0.94	35.85	0.98
13-14	8.36	0.12	50.73	0.92	40.91	1.12
15-16	9.38	0.14	49.50	0.90	41.13	1.13
17-18	11.53	0.17	50.26	0.92	38.21	1.05
19-20	5.39	0.08	50.92	0.93	43.69	1.20
21-22	13.67	0.20	48.14	0.88	38.19	1.05
23-24	6.37	0.09	51.15	0.93	42.48	1.17
25-26	6.02	0.09	57.58	1.05	36.40	1.00
27-28	7.70	0.11	51.34	0.94	40.96	1.13
28-29	6.74	0.10	56.33	1.03	36.94	1.01
Promedio	10.19		51.78		38.03	
Máximo	16.03		59.68		43.69	
Mínimo	5.39		47.84		26.92	

**Anexo 7 Concentración (%) de elementos mayores en el núcleo de sedimento LT01.**

Profundidad (cm)	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mn <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	MnO	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>
0-1	32.67	9.29	0.42	4.18	0.09	0.08	17.97	3.71	1.57	0.48	0.64	0.41
1-2	34.36	9.77	0.46	4.41	0.08	0.07	18.45	3.96	1.30	0.52	0.70	0.81
3-4	35.32	9.35	0.44	4.05	0.07	0.06	20.48	3.75	1.25	0.65	0.70	0.47
5-6	33.80	8.83	0.44	3.87	0.06	0.06	20.55	3.65	1.20	0.64	0.72	0.40
7-8	32.32	8.62	0.40	3.78	0.06	0.06	21.26	3.49	0.97	0.57	0.74	0.51
9-10	33.91	9.06	0.43	4.06	0.07	0.06	22.76	3.86	1.05	0.64	0.75	0.66
11-12	33.08	8.87	0.44	3.94	0.06	0.06	21.40	3.66	1.31	0.63	0.75	0.74
13-14	30.82	8.39	0.38	3.80	0.06	0.06	24.34	3.61	1.04	0.75	0.75	0.46
15-16	31.54	8.52	0.40	3.81	0.07	0.07	22.51	3.40	1.10	0.72	0.74	0.44
17-18	33.41	9.22	0.41	4.15	0.07	0.07	23.22	3.71	0.98	0.60	0.75	0.81
19-20	32.97	8.71	0.42	3.94	0.09	0.08	23.58	3.94	0.99	0.52	0.80	0.88
21-22	33.70	9.56	0.45	4.26	0.08	0.07	18.35	3.82	1.64	0.53	0.68	0.43
23-24	35.34	10.12	0.47	4.53	0.08	0.07	19.00	3.95	1.29	0.56	0.70	0.82
25-26	35.41	9.37	0.48	4.08	0.07	0.07	20.31	3.78	1.40	0.65	0.69	0.46
26-27	34.04	8.93	0.41	3.86	0.07	0.06	20.50	3.62	1.23	0.53	0.72	0.41
27-28	37.98	10.29	0.47	4.59	0.08	0.07	27.89	4.25	0.86	0.77	0.82	0.56
Promedio	33.79	9.18	0.43	4.08	0.07	0.07	21.41	3.76	1.20	0.61	0.73	0.58
Máximo	37.98	10.29	0.48	4.59	0.09	0.08	27.89	4.25	1.64	0.77	0.82	0.88
Mínimo	30.82	8.39	0.38	3.78	0.06	0.06	17.97	3.40	0.86	0.48	0.64	0.40



**Anexo 8 Concentración (%) de elementos mayores en el núcleo de sedimento LT02.**

Profundidad (cm)	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mn <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	MnO	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>
0-1	31.80	8.53	0.40	3.77	0.08	0.07	22.67	3.65	1.25	0.52	0.79	0.85
1-2	32.10	8.47	0.41	3.65	0.08	0.07	22.38	3.78	1.03	0.51	0.73	0.20
3-4	30.41	8.14	0.38	3.57	0.06	0.06	24.03	3.60	0.92	0.45	0.83	0.79
5-6	30.13	7.98	0.37	3.52	0.06	0.06	25.45	3.52	0.87	0.54	1.31	0.47
7-8	29.91	7.95	0.32	3.52	0.06	0.06	24.12	3.48	0.64	0.52	1.29	0.95
9-10	28.56	7.76	0.37	3.51	0.07	0.07	24.19	3.12	0.88	0.56	0.81	0.71
11-12	29.90	8.02	0.40	3.70	0.06	0.06	24.68	3.62	0.87	0.69	1.30	1.61
13-14	29.30	7.96	0.37	3.51	0.06	0.06	25.05	3.29	0.80	0.59	1.27	0.46
15-16	31.52	8.56	0.40	3.79	0.07	0.06	23.13	3.58	0.71	0.68	0.81	1.50
17-18	31.22	8.48	0.42	3.73	0.07	0.06	22.23	3.48	1.26	0.55	0.86	1.79
19-20	30.87	8.22	0.39	3.62	0.06	0.05	24.21	3.53	0.46	0.60	0.82	0.89
21-22	35.15	9.58	0.44	4.14	0.07	0.06	27.94	4.03	0.95	0.75	0.89	1.40
22-23	30.33	8.19	0.37	3.63	0.06	0.05	25.77	3.73	0.89	0.64	1.41	2.07
Promedio	30.86	8.30	0.39	3.67	0.06	0.06	24.30	3.57	0.89	0.59	1.01	1.05
Máximo	35.15	9.58	0.44	4.14	0.08	0.07	27.94	4.03	1.26	0.75	1.41	2.07
Mínimo	28.56	7.76	0.32	3.51	0.06	0.05	22.23	3.12	0.46	0.45	0.73	0.20

**Anexo 9 Concentración (%) de elementos mayores en el núcleo de sedimento LT03.**

Profundidad (cm)	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mn <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	MnO	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>
0-1	35.06	8.70	0.40	3.49	0.05	0.05	17.73	3.12	2.09	0.44	0.72	2.23
1-2	34.56	8.62	0.40	3.47	0.05	0.05	18.06	2.90	1.80	0.39	0.69	2.04
3-4	33.36	8.73	0.36	3.52	0.05	0.05	18.52	3.00	1.43	0.52	0.73	2.21
5-6	32.88	8.34	0.38	3.38	0.05	0.05	21.77	2.90	1.18	0.48	0.76	2.00
7-8	33.58	8.92	0.40	3.60	0.05	0.05	20.67	2.87	1.04	0.46	0.75	2.01
9-10	35.41	9.41	0.41	3.80	0.05	0.05	21.32	3.20	1.06	0.53	0.77	2.12
11-12	35.18	9.37	0.42	3.81	0.05	0.05	20.41	3.06	0.84	0.60	0.73	2.07
13-14	34.73	9.22	0.41	3.68	0.05	0.05	19.05	2.80	1.09	0.55	0.70	1.97
15-16	37.24	9.85	0.45	3.95	0.04	0.04	17.74	2.93	0.97	0.57	0.71	2.20
17-18	41.11	10.98	0.49	4.35	0.05	0.05	15.73	3.35	1.21	0.79	0.63	2.02
19-20	40.20	10.88	0.49	4.23	0.06	0.06	13.95	3.16	1.15	0.90	0.55	2.01
21-22	39.23	10.56	0.49	4.20	0.05	0.05	17.52	3.21	1.47	0.78	0.64	2.00
23-24	41.67	11.32	0.50	4.55	0.06	0.06	14.25	3.09	1.28	0.97	0.53	2.25
25-26	41.51	11.30	0.52	4.57	0.06	0.06	14.07	3.23	1.57	1.03	0.50	1.55
27-28	46.25	11.95	0.58	4.65	0.06	0.05	11.13	3.09	1.38	1.17	0.48	2.01
28-29	52.29	13.38	0.64	5.25	0.07	0.07	13.05	3.65	1.78	1.11	0.42	1.53
Promedio	38.39	10.10	0.46	4.03	0.05	0.05	17.19	3.10	1.33	0.71	0.64	2.01
Máximo	52.29	13.38	0.64	5.25	0.07	0.07	21.77	3.65	2.09	1.17	0.77	2.25
Mínimo	32.88	8.34	0.36	3.38	0.04	0.04	11.13	2.80	0.84	0.39	0.42	1.53

**Anexo 10 Concentración ( $\mu\text{g g}^{-1}$ ) de níquel (Ni), cromo (Cr) y plomo (Pb) en el núcleo de sedimento LT01.**

Muestra	Sección (cm)	Profundidad (cm)	Ni ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )	Cr ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )	Pb ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )
30	0-1	1	116.79	162.26	13.57
31	1-2	2	126.50	187.47	18.81
32	3-4	4	118.91	149.98	18.49
33	5-6	6	112.90	165.35	9.66
34	7-8	8	115.12	175.19	14.20
35	9-10	10	107.53	140.05	17.90
36	11-12	12	108.52	173.69	12.18
37	13-14	14	111.48	163.91	12.51
38	15-16	16	109.38	134.39	16.34
39	17-18	18	160.76	167.02	12.18
40	19-20	20	119.05	157.32	10.13
41	21-22	22	113.44	165.10	13.79
42	23-24	24	118.47	173.93	11.33
43	25-26	26	118.62	166.46	6.89
44	26-27	27	119.31	172.28	14.37
45	27-28	28	98.18	132.80	13.72
Promedio			117.19	161.70	13.50
Máximo			160.76	187.47	18.81
Mínimo			98.18	132.80	6.89
Desv. Est.			13.32	15.36	3.28
C.V.			11.36	9.50	24.25

**Anexo 11 Concentración ( $\mu\text{g g}^{-1}$ ) de níquel (Ni), cromo (Cr) y plomo (Pb) en el núcleo de sedimento LT02.**

Muestra	Sección (cm)	Profundidad (cm)	Ni ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )	Cr ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )	Pb ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )
29	0-1	1	97.05	118.63	17.59
28	1-2	2	105.73	154.81	10.69
27	3-4	4	92.83	131.18	14.83
26	5-6	6	105.15	156.16	9.58
25	7-8	8	97.81	140.12	19.16
24	9-10	10	106.65	153.12	9.73
23	11-12	12	97.01	143.32	13.56
22	13-14	14	113.79	183.06	7.47
21	15-16	16	118.49	169.41	8.98
20	17-18	18	105.54	149.54	12.24
19	19-20	20	104.24	171.09	11.11
18	21-22	22	110.19	167.46	10.38
17	22-23	23	101.86	128.77	12.60
Promedio			104.33	151.28	12.15
Máximo			118.49	183.06	19.16
Mínimo			92.83	118.63	7.47
Desv. Est.			7.20	18.71	3.40
C.V.			6.90	12.37	28.01

**Anexo 12 Concentración ( $\mu\text{g g}^{-1}$ ) de níquel (Ni), cromo (Cr) y plomo (Pb) en el núcleo de sedimento LT03.**

Muestra	Sección (cm)	Profundidad (cm)	Ni ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )	Cr ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )	Pb ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )
1	0-1	1	96.49	142.24	13.04
2	1-2	2	104.49	189.25	8.57
3	3-4	4	124.67	188.42	17.14
4	5-6	6	93.86	149.64	13.63
5	7-8	8	105.36	150.19	11.77
6	9-10	10	106.37	152.83	14.70
7	11-12	12	101.97	165.74	18.04
8	13-14	14	103.08	162.12	11.17
9	15-16	16	106.52	170.89	13.20
10	17-18	18	127.15	232.86	8.35
11	19-20	20	143.15	243.47	8.12
12	21-22	22	131.85	251.97	9.24
13	23-24	24	134.18	245.30	8.08
14	25-26	26	156.30	271.52	7.97
15	27-28	28	144.62	261.77	7.51
16	28-29	29	137.33	292.10	9.25
Promedio			119.84	204.39	11.24
Valor máximo			156.30	292.10	18.04
Valor mínimo			93.86	142.24	7.51
Desv. Est.			19.74	51.06	3.40
C.V.			16.47	24.98	30.29

**Anexo 13 Actividad de  $^{210}\text{Pb}_{\text{tot}}$ , TAM y TAS del núcleo de sedimento LT01.**

Sección (cm)	Profundidad (cm)	$^{210}\text{Pb}$ (Bq kg <sup>-1</sup> )	u ( $^{210}\text{Pb}$ )	TAM (g cm <sup>-2</sup> yr <sup>-1</sup> )	u(TAM)	TAS (g cm <sup>-2</sup> yr <sup>-1</sup> )	u(TAS)
0-1	0.5	63.6	7.9	0.61	0.13	1.26	0.27
1-2	1.5	65.2	7.6	0.55	0.11	1.40	0.28
2-3	2.5			0.51	0.10	1.27	0.24
3-4	3.5	72.3	7.4	0.47	0.08	0.85	0.16
4-5	4.5			0.50	0.09	0.89	0.16
5-6	5.5	59.9	5.1	0.54	0.09	0.77	0.13
6-7	6.5			0.50	0.09	1.12	0.21
7-8	7.5	63.3	7.1	0.46	0.09	0.83	0.17
8-9	8.5			0.48	0.10	0.71	0.15
9-10	9.5	56.0	6.5	0.50	0.11	0.87	0.19
10-11	10.5			0.45	0.10	0.72	0.16
11-12	11.5	61.9	7.1	0.41	0.09	0.54	0.12
12-13	12.5			0.49	0.12	0.66	0.16
13-14	13.5	44.6	6.2	0.61	0.17	0.88	0.25
14-15	14.5			0.58	0.17	0.87	0.26
15-16	15.5	44.6	6.8	0.56	0.17	0.57	0.18
16-17	16.5			0.43	0.12	0.48	0.13
17-18	17.5	55.5	6.9	0.34	0.09	0.45	0.12
18-19	18.5			0.38	0.11	0.63	0.18
19-20	19.5	46.7	5.7	0.43	0.13	0.44	0.13
20-21	20.5			0.38	0.11	0.44	0.13
21-22	21.5	47.4	4.8	0.33	0.10	0.31	0.09
22-23	22.5			0.35	0.12	0.47	0.16
23-24	23.5	41.1	5.7	0.37	0.14	0.39	0.15
24-25	24.5			0.38	0.16	0.56	0.24
25-26	25.5	35.7	6.1	0.39	0.18	0.35	0.16
26-27	26.5	35.4	7.0	0.52	0.33	0.83	0.53
27-28	27.5	37.8	5.6	0.34	0.16	0.44	0.21

**Anexo 14 Actividad de  $^{210}\text{Pb}_{\text{tot}}$ , TAM y TAS del núcleo de sedimento LT02.**

Sección (cm)	Profundidad (cm)	$^{210}\text{Pb}$ (Bq kg <sup>-1</sup> )	u ( $^{210}\text{Pb}$ )	TAM (g cm <sup>-2</sup> yr <sup>-1</sup> )	u(TAM)	TAS (g cm <sup>-2</sup> yr <sup>-1</sup> )	u(TAS)
0-1	0.5	63.1	5.9	0.54	0.17	1.93	0.62
1-2	1.5	52.6	6.4	0.69	0.29	1.76	0.74
2-3	2.5			0.64	0.24	0.98	0.38
3-4	3.5	56.0	5.5	0.58	0.20	0.68	0.24
4-5	4.5			0.52	0.16	0.70	0.21
5-6	5.5	57.3	4.0	0.48	0.13	0.75	0.21
6-7	6.5			0.48	0.15	0.73	0.23
7-8	7.5	52.0	4.7	0.49	0.18	0.62	0.22
8-9	8.5			0.53	0.21	0.62	0.24
9-10	9.5	47.1	5.5	0.58	0.26	0.76	0.35
10-11	10.5			0.52	0.22	0.55	0.24
11-12	11.5	52.3	5.5	0.45	0.19	0.49	0.21
12-13	12.5			0.46	0.22	0.45	0.22
13-14	13.5	46.4	6.5	0.46	0.26	0.40	0.22
14-15	14.5			0.46	0.26	0.52	0.30
15-16	15.5	43.6	5.8	0.45	0.26	0.50	0.29
16-17	16.5			0.42	0.25	0.38	0.22
17-18	17.5	46.6	5.8	0.40	0.24	0.53	0.33
18-19	18.5			0.43	0.28	0.30	0.20
19-20	19.5	37.1	5.1	0.47	0.35	0.44	0.33
20-21	20.5			0.46	0.35	0.59	0.45
21-22	21.5	32.7	4.6	0.45	0.36	0.49	0.38
22-23	22.5						

**Anexo 15 Actividad de  $^{210}\text{Pb}_{\text{tot}}$ , TAM y TAS del núcleo de sedimento LT03.**

Sección (cm)	Profundidad (cm)	$^{210}\text{Pb}$ (Bq kg <sup>-1</sup> )	u ( $^{210}\text{Pb}$ )	TAM (g cm <sup>-2</sup> yr <sup>-1</sup> )	u(TAM)	TAS (g cm <sup>-2</sup> yr <sup>-1</sup> )	u(TAS)
0-1	0.5	73.5	9.4	0.18	0.04	0.68	0.14
1-2	1.5	81.3	8.2	0.14	0.02	0.31	0.05
2-3	2.5			0.13	0.02	0.31	0.06
3-4	3.5	75.5	8.4	0.13	0.02	0.25	0.05
4-5	4.5			0.12	0.03	0.17	0.04
5-6	5.5	61.8	11.6	0.12	0.04	0.20	0.06
6-7	6.5			0.11	0.03	0.10	0.03
7-8	7.5	50.5	8.8	0.10	0.04	0.15	0.05
8-9	8.5			0.13	0.06	0.14	0.07
9-10	9.5	30.5	9.9	0.19	0.18	0.28	0.26
10-11	10.5			0.19	0.18	0.29	0.27
11-12	11.5	28.2	8.2	0.19	0.18	0.23	0.22
12-13	12.5			0.09	0.07	0.14	0.10
13-14	13.5	43.9	11.8	0.04	0.02	0.03	0.02
14-15	14.5			0.03	0.03	0.04	0.05
15-16	15.5	26.4	7.9	0.04	0.08	0.06	0.13
16-17	16.5			0.03	0.09	0.05	0.16
17-18	17.5	23.4	8.6				
18-19	18.5						
19-20	19.5	19.5	8.0				
20-21	20.5						
21-22	21.5	22.7	10.2				
22-23	22.5						
23-24	23.5	12.3	5.7				
24-25	24.5						
25-26	25.5	29.8	8.3				
26-27	26.5						
27-28	27.5	25.5	7.0				
28-29	28.5						

**Anexo 16 Actividades ( $Bq\ kg^{-1}$ ) de  $^{210}Pb_{tot}$  y  $^{210}Pb_{base}$  de los núcleos de sedimento LT01, LT02 y LT03.**

Núcleo	$^{210}Pb_{ex}$	$^{210}Pb_{base}$
LT01	35.4-72.3	18.9 ± 1.7
LT02	32.7-63.1	20.4 ± 8.3
LT03	12.3-81.3	20.5 ± 1.5

**Anexo 17 ANOVAS de los núcleos de sedimento LT01, LT02 y LT03: A) Materia Orgánica B) Carbonato.**

A)

	G.L.	S.C.	C.M.	F
Residual y total	2	18.54	9.27	4.98
Error	42	78.23	1.86	
Total	44	96.77		
Valor crítico para F=	3.22		F > F crítico	Se rechaza H0

H0: LT01 = LT02 = LT03  
Ha: alguna  $\mu$  es diferente de las otras.

B)

	G.L.	S.C.	C.M.	F
Residual y total	2	209.98	104.99	38.80
Error	42	113.66	2.71	
Total	44	323.64		
Valor crítico para F=	3.22		F > F crítico	Se rechaza H0

H0: LT01 = LT02 = LT03  
Ha: alguna  $\mu$  es diferente de las otras.

**Anexo 18 ANOVAS de los núcleos de sedimento LT01, LT02 y LT03: A) Arenas B) Limos C) Arcillas D) SiO<sub>2</sub> E) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> F) TiO<sub>2</sub>G) Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> H) MnO.**

B)

	G.L.	S.C.	C.M.	F
Residual y total	2	248.36	124.18	8.45
Error	41	602.71	14.70	
Total	43	851.08		
Valor crítico para F=	3.23		F > F crítico	Se rechaza H0
<b>H0: LT01 = LT02 = LT03</b> <b>Ha: alguna μi es diferente de las otras.</b>				

	G.L.	S.C.	C.M.	F
Residual y total	2	2409.29	1204.64	101.33
Error	41	487.44	11.89	
Total	43	2896.73		
Valor crítico para F=	3.23		F > F crítico	Se rechaza H0
<b>H0: LT01 = LT02 = LT03</b> <b>Ha: alguna μi es diferente de las otras.</b>				

C)

	G.L.	S.C.	C.M.	F
Residual y total	2	1231.26	615.63	81.49
Error	41	309.75	7.55	
Total	43	1541.01		
Valor crítico para F=	3.23		F > F crítico	Se rechaza H0
<b>H0: LT01 = LT02 = LT03</b> <b>Ha: alguna μi es diferente de las otras.</b>				

D)

	G.L.	S.C.	C.M.	F
Residual y total	2	422.11	211.05	17.69
Error	42	501.18	11.93	
Total	44	923.28		
Valor crítico para F=	3.22		F > F crítico	Se rechaza H0
<b>H0: LT01 = LT02 = LT03</b> <b>Ha: alguna μi es diferente de las otras.</b>				

E)

	G.L.	S.C.	C.M.	F
Residual y total	2	23.36	11.68	12.84
Error	42	38.18	0.91	
Total	44	61.54		
Valor crítico para F=	3.22		F > F crítico	Se rechaza H0
<b>H0: LT01 = LT02 = LT03</b> <b>Ha: alguna μi es diferente de las otras.</b>				

F)

	G.L.	S.C.	C.M.	F
Residual y total	2	0.04	0.02	7.10
Error	42	0.11	0.00	
Total	44	0.15		
Valor crítico para F=	3.22		F > F crítico	Se rechaza H0
<b>H0: LT01 = LT02 = LT03</b> <b>Ha: alguna μi es diferente de las otras.</b>				

G)

	G.L.	S.C.	C.M.	F
Residual y total	2	1.43	0.71	5.28
Error	42	5.67	0.14	
Total	44	7.10		
Valor crítico para F=	3.22		F > F crítico	Se rechaza H0
<b>H0: LT01 = LT02 = LT03</b> <b>Ha: alguna μi es diferente de las otras.</b>				

H)

	G.L.	S.C.	C.M.	F
Residual y total	2	0.00244	0.00122	25.50
Error	42	0.00201	0.00005	
Total	44	0.00445		
Valor crítico para F=	3.22		F > F crítico	Se rechaza H0
<b>H0: LT01 = LT02 = LT03</b> <b>Ha: alguna μi es diferente de las otras.</b>				

**Anexo 19 ANOVAS de los núcleos de sedimento LT01, LT02 y LT03: A) Pb B) Ni C) Cr D) <sup>210</sup>Pb E) <sup>226</sup>Ra F) TAM G) TAS.**

A)

	G.L.	S.C.	C.M.	F
Residual y total	2	41.61	20.80	1.84
Error	42	473.61	11.28	
Total	44	515.22		
Valor crítico para F=	3.22		F < F crítico	Se acepta H0

H0: LT01 = LT02 = LT03  
Ha: alguna  $\mu$  es diferente de las otras.

B)

	G.L.	S.C.	C.M.	F
Residual y total	2	1914.18	957.09	4.41
Error	42	9125.38	217.27	
Total	44	11039.56		
Valor crítico para F=	3.22		F > F crítico	Se rechaza H0

H0: LT01 = LT02 = LT03  
Ha: alguna  $\mu$  es diferente de las otras.

C)

	G.L.	S.C.	C.M.	F
Residual y total	2	23910.64	11955.32	10.72
Error	42	46850.51	1115.49	
Total	44	70761.15		
Valor crítico para F=	3.22		F > F crítico	Se rechaza H0

H0: LT01 = LT02 = LT03  
Ha: alguna  $\mu$  es diferente de las otras.

D)

	G.L.	S.C.	C.M.	F
Residual y total	2	1103.20	551.60	2.20
Error	40	10043.34	251.08	
Total	42	11146.53		
Valor crítico para F=	3.23		F < F crítico	Se acepta H0

H0: LT01 = LT02 = LT03  
Ha: alguna  $\mu$  es diferente de las otras.

E)

	G.L.	S.C.	C.M.	F
Residual y total	2	24.20	12.10	4.47
Error	40	108.21	2.71	
Total	42	132.41		
Valor crítico para F=	3.23		F > F crítico	Se rechaza H0

H0: LT01 = LT02 = LT03  
Ha: alguna  $\mu$  es diferente de las otras.

F)

	G.L.	S.C.	C.M.	F
Residual y total	2	1.67	0.83	151.84
Error	64	0.35	0.01	
Total	66	2.02		
Valor crítico para F=	3.14		F > F crítico	Se rechaza H0

H0: LT01 = LT02 = LT03  
Ha: alguna  $\mu$  es diferente de las otras.

G)

	G.L.	S.C.	C.M.	F
Residual y total	2	3.20	1.60	16.73
Error	64	6.11	0.10	
Total	66	9.31		
Valor crítico para F=	3.14		F > F crítico	Se rechaza H0

H0: LT01 = LT02 = LT03  
Ha: alguna  $\mu$  es diferente de las otras.

**Anexo 20 Tabla de correlación de Pearson de las variables del núcleo de sedimento LT01.**

	MO	C	Arenas	Limos	Arcillas	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	Pb	Ni	Cr	<sup>210</sup> Pb	TAM	TAS
MO	1															
C	-0.9526	1														
Arenas	-0.6478	0.6736	1													
Limos	0.6376	-0.6855	-0.9165	1												
Arcillas	0.3011	-0.2679	-0.6001	0.2301	1											
SiO <sub>2</sub>	-0.4442	0.3306	0.1349	-0.2242	0.1202	1										
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-0.1779	0.0653	-0.1567	-0.0744	0.5302	0.8473	1									
TiO <sub>2</sub>	-0.2202	0.0938	0.2282	-0.3646	0.1739	0.8486	0.8333	1								
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-0.0916	-0.0106	-0.2055	-0.0634	0.6269	0.7366	0.9710	0.7538	1							
MnO	-0.1074	0.1242	0.0094	-0.3178	0.6130	0.3500	0.5772	0.4358	0.6545	1						
Pb	-0.9123	0.8067	0.6784	-0.7009	-0.2488	0.4295	0.2349	0.2956	0.1698	0.0880	1					
Ni	0.3138	-0.3979	-0.2517	0.2107	0.1909	-0.1216	0.0127	-0.1150	0.0403	0.0790	-0.1181	1				
Cr	0.4172	-0.5190	-0.2587	0.1828	0.2638	-0.1785	0.0060	0.0575	-0.0081	-0.1193	-0.1610	0.4194	1			
<sup>210</sup> Pb	0.8162	-0.7800	-0.7134	0.7847	0.1663	-0.2073	-0.1386	-0.1726	-0.1349	-0.2661	-0.8907	0.1832	0.2060	1		
TAM	0.4990	-0.3183	-0.1706	0.2782	-0.1413	-0.5775	-0.5376	-0.5547	-0.4945	-0.3098	-0.5575	-0.1811	0.0308	0.2881	1	
TAS	0.6959	-0.5470	-0.5237	0.4973	0.2796	-0.2501	-0.1286	-0.2734	-0.1032	-0.1774	-0.7025	0.0034	0.2536	0.5782	0.7587	1

**Anexo 21 Tabla de correlación de Pearson de las variables del núcleo de sedimento LT02.**

	MO	C	Arenas	Limos	Arcillas	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	Pb	Ni	Cr	<sup>210</sup> Pb	TAM	TAS
MO	1															
C	-0.7765	1														
Arenas	-0.4413	0.3077	1													
Limos	0.4741	-0.2869	-0.9178	1												
Arcillas	-0.0378	-0.0788	-0.2914	-0.1123	1											
SiO <sub>2</sub>	-0.3823	0.2567	-0.0920	-0.0286	0.2994	1										
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-0.4160	0.2132	-0.0906	-0.0549	0.3591	0.9806	1									
TiO <sub>2</sub>	-0.5144	0.2490	0.0331	-0.0611	0.0644	0.7095	0.7420	1								
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-0.4910	0.2362	-0.0753	-0.0964	0.4210	0.9122	0.9560	0.7664	1							
MnO	0.2464	-0.2888	-0.7072	0.6531	0.1965	0.4065	0.3778	0.4198	0.3277	1						
Pb	0.3658	-0.1715	-0.4050	0.4112	0.0231	-0.0161	-0.0844	-0.3527	-0.0500	0.1135	1					
Ni	-0.2365	-0.1514	0.1773	-0.2679	0.2016	0.2046	0.2931	0.2744	0.2545	0.0723	-0.8059	1				
Cr	-0.4123	0.1484	0.3848	-0.5041	0.2515	0.0996	0.1449	0.1913	0.0924	-0.1342	-0.7973	0.8152	1			
<sup>210</sup> Pb	0.6833	-0.2728	-0.4103	0.6254	-0.5216	-0.4005	-0.4795	-0.3671	-0.4785	0.2180	0.5079	-0.5950	-0.7503	1		
TAM	0.4337	-0.0564	-0.6081	0.6116	0.0289	-0.0568	-0.1504	-0.0900	-0.2662	0.5801	0.1116	-0.2676	-0.3219	0.4082	1	
TAS	0.4179	-0.1736	-0.6317	0.7218	-0.1899	0.1969	0.0997	0.1243	0.0225	0.8149	0.3338	-0.2929	-0.5498	0.6087	0.7101	1

**Anexo 22 Tabla de correlación de Pearson de las variables del núcleo de sedimento LT03.**

	MO	C	Arenas	Limos	Arcillas	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	Pb	Ni	Cr	<sup>210</sup> Pb	TAM	TAS
MO	1															
C	0.6420	1														
Arenas	0.6344	0.5703	1													
Limos	0.1273	-0.2582	-0.3413	1												
Arcillas	-0.6574	-0.2618	-0.5575	-0.5901	1											
SiO <sub>2</sub>	-0.7091	-0.8443	-0.6037	0.2528	0.2952	1										
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-0.7846	-0.8957	-0.6494	0.2502	0.3368	0.9793	1									
TiO <sub>2</sub>	-0.7477	-0.8786	-0.6045	0.2577	0.2916	0.9879	0.9826	1								
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-0.7772	-0.8929	-0.6435	0.2682	0.3158	0.9700	0.9966	0.9749	1							
MnO	-0.5806	-0.5878	-0.5757	0.4148	0.1281	0.7800	0.7680	0.7535	0.7655	1						
Pb	0.5812	0.6160	0.3998	-0.1094	-0.2467	-0.6174	-0.6302	-0.6585	-0.6110	-0.5215	1					
Ni	-0.6298	-0.8236	-0.5805	0.2482	0.2794	0.7421	0.8134	0.7596	0.8112	0.6940	-0.6395	1				
Cr	-0.7169	-0.8297	-0.4868	0.1585	0.2781	0.8779	0.9096	0.8868	0.9063	0.7630	-0.7152	0.9283	1			
<sup>210</sup> Pb	0.8566	0.7226	0.5425	0.0819	-0.5180	-0.7017	-0.8077	-0.7458	-0.8174	-0.3405	0.3602	-0.5463	-0.5720	1		
TAM	0.1050	0.6682	0.1948	-0.0152	-0.1130	-0.1491	-0.2575	-0.2668	-0.1881	0.5429	0.4093	-0.1195	-0.1774	0.1442	1	
TAS	0.3385	0.9050	-0.1105	0.1955	-0.0926	-0.0596	-0.4293	-0.2762	-0.4286	0.3604	0.0426	-0.2237	-0.2783	0.5222	0.7261	1