



S.E.P.

S.E.S.

Tec.N.M.

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TOLUCA

“CARACTERIZACIÓN DE SEDIMENTOS DE LOS LAGOS DE “EL SOL” Y “LA LUNA” DEL NEVADO DE TOLUCA”

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERIA AMBIENTAL**

**PRESENTA: MARTÍN ANDRADE ROMERO
NO. DE CONTROL: M20280292**

**DIRECTOR:
DRA. MARÍA DEL CARMEN DÍAZ NAVA**

**CO-DIRECTOR:
DRA. CLAUDIA ROSARIO MURO URISTA**

METEPEC, ESTADO DE MÉXICO, AGOSTO, 2022.



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Toluca
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Metepec, Edo. de México., 22/noviembre/2022
DEPI-3200-MCIAM-085/2022

**C. MARTÍN ANDRADE ROMERO
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN
CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL
PRESENTE**

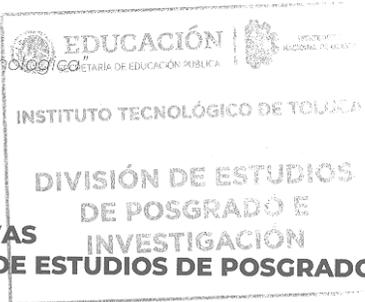
De acuerdo con los Lineamientos para la Operación de los Estudios de Posgrado en el Tecnológico Nacional de México y las disposiciones en este Instituto, habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora realizó con respecto a su Trabajo de Tesis titulado "**CARACTERIZACIÓN DE SEDIMENTOS DE LOS LAGOS DE "EL SOL" Y "LA LUNA" DEL NEVADO DE TOLUCA**", la División de Estudios de Posgrado e Investigación de este Instituto, concede la Autorización para que proceda a la impresión del mismo.

Sin más por el momento, quedo de usted.

ATENTAMENTE

"Excelencia en educación tecnológica"
"Educación, integridad y ciencia"

**JOSÉ LUIS GARCÍA RIVAS
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
E INVESTIGACIÓN**



ccp. Archivo
JLGR/IMAB



Av. Tecnológico S/N, Col. Agrícola Bellavista, C.P.52149, Metepec, Edo. de México. Tels. Dirección 722 208 72 05,
Subd. Académica 722 208 7207, Subd. de Planeación 208 7206, Subd. Administrativa 722 208 7208,
Conmut. 722 208 72 00, e-mail: info@toluca.tecnm.mx. tecnm.mx | toluca.tecnm.mx



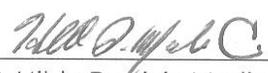
2022 Flores
Año de Magón
PRESENCIA DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA

Meteppec, Edo. de México, 16/noviembre/2022

DR. JOSÉ LUIS GARCÍA RIVAS
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN
PRESENTE

Por este medio comunicamos a usted que la comisión Revisora designada para analizar la tesis denominada **"CARACTERIZACIÓN DE SEDIMENTOS DE LOS LAGOS DE "EL SOL" Y "LA LUNA" DEL NEVADO DE TOLUCA"**, que como parte de los requisitos para obtener el grado académico de Maestro en Ciencias en Ingeniería Ambiental presenta el **C. Martín Andrade Romero** con número de control **m20280292** para sustentar el acto de Recepción Profesional, ha dictaminado que dicho trabajo reúne las características de contenido y calidad para proceder a la impresión del mismo.

ATENTAMENTE

 _____ Dr. María del Carmen Díaz Nava DIRECTORA DE TESIS	 <p>EDUCACIÓN SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA</p> <p>INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TOLUCA</p> <p>DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN</p>	 _____ Dra. Claudia Rosario Muro Urista CODIRECTORA DE TESIS
 _____ M. en C. Hilda Patricia Medina Caballero REVISORA DE TESIS		 _____ Dr. Marcos José Solache Ríos REVISOR DE TESIS

ccp. Archivo
JLGR/IMAB



AGRADECIMIENTOS

Al Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Toluca, por darme la oportunidad de crecer profesionalmente y por todas las facilidades brindadas para la realización de este proyecto.

A la Dra. María del Carmen Díaz Nava, gracias por volver a darme la oportunidad de colaborar usted en un nuevo proyecto, por el tiempo, dedicación y sobre todo el apoyo brindado durante todo este periodo.

A la Dra. Claudia Rosario Muro Urista por aceptarme en su equipo de trabajo, gracias a ello pude contemplar paisajes muy impresionantes y realizar diversas actividades que me ayudaron a crecer profesionalmente.

A mis revisores: M. en C. Hilda Patricia Medina Caballero y Dr. Marcos José Solache Ríos, por su apoyo, tiempo y aportaciones realizadas en esta investigación.

Al CONACYT por el apoyo otorgado, a través de la beca No. 1083217.

Resumen

Se ha reportado que los metales pesados han llegado a través de partículas suspendidas a cuerpos de agua tan remotos como los Lagos de Montaña por acción de la lluvia o por medio de escorrentía. Por otro lado, actualmente no existe un monitoreo continuo de contaminantes en los cuerpos de agua del Nevado de Toluca, lo que genera cierta preocupación sobre el estatus de contaminación en este sitio. Por lo que el objetivo de este proyecto fue caracterizar los sedimentos de los lagos El Sol y La Luna en el Nevado de Toluca, para ello se planteó la determinación de algunos parámetros fisicoquímicos.

Para este proyecto se consideraron tres puntos de muestreo en el lago La Luna y cuatro para el lago El Sol. Posteriormente se determinaron los siguientes parámetros: granulometría, densidad aparente y real, contenido de materia orgánica; se observó la morfología de los sedimentos por microscopía electrónica de barrido y se realizó un análisis elemental por EDS. Finalmente, se determinó el contenido de metales pesados.

Los resultados de granulometría muestran que todas las muestras contienen por lo menos un 90% de partículas de arenas en su composición, por tanto, se pueden clasificar según la USDA con una textura “arenosa”. Los resultados obtenidos de densidad aparente indican una baja compactación, lo cual promueve la infiltración de agua. Los valores de densidad real son cercanos al valor considerado como el promedio para la mayoría de minerales (2.65 g/mL). El contenido de materia orgánica según la NOM-021-RECNAT-2000 se clasifican como “muy bajo”. Se tomaron micrografías, con lo cual se observó la morfología de las partículas que conforman las muestras, así como micro algas presentes; Por medio del análisis EDS se halló Si, Ti, Al, Mg, Na, Ca, Fe y O, elementos comúnmente reportados en sedimentos del área. El contenido de metales pesados determinado por EAAF presentó valores máximos de 0.03 mg/kg (Cd), 29.87 mg/kg (Pb) y 0.09 mg/kg (Ni), valores que se encuentran por debajo de los límites marcados por la NOM-147-SEMARNAT-SSA1-2004.

Abstract

Heavy metals have been reported to have reached bodies of water as remote as the Mountain Lakes through the action of rain or through runoff through suspended particles. On the other hand, there is currently no continuous monitoring of pollutants in the Nevado de Toluca water bodies, which raises some concern about the contamination status at this site. Therefore, the objective of this project was to characterize the sediments of the El Sol and La Luna lakes in the Nevado de Toluca, for which the determination of some physicochemical parameters was proposed.

For this project, three sampling points were considered in Lake La Luna and four in Lake El Sol. Subsequently, the following parameters were determined: granulometry, apparent and real density, content of organic matter; the morphology of the sediments was observed by scanning electron microscopy and elemental analysis was performed by EDS. Finally, content of heavy metals was determined.

The granulometry results show that all the samples contain at least 90% of sand particles in their composition, therefore, they can be classified according to the USDA with a "sandy" texture. The apparent density results obtained indicate low compaction, which promotes water infiltration. The real density values are close to the value considered as the average for most minerals (2.65 g/mL). The organic matter content according to NOM-021-RECNAT-2000 is classified as "very low". Micrographs were taken, with which the morphology was observed at different magnifications of the particles that make up the samples, as well as the microalgae present; Through the EDS analysis, Si, Ti, Al, Mg, Na, Ca, Fe and O were found, elements commonly reported in sediments of the area. The content of heavy metals determined by EAAF presented maximum values of 0.03 mg/kg (Cd), 29.87 mg/kg (Pb) and 0.09 mg/kg (Ni), values that are below the limits set by NOM-147-SEMARNAT-SSA1- 2004.

Índice

Introducción	1
1. Fundamentos	3
1.1 Antecedentes	3
1.2 Lagos de alta montaña.....	12
1.3 Lagos del El Sol y La Luna del Nevado de Toluca (NT)	13
1.4 Sedimentos	17
1.5 Metales pesados.	19
1.5.1 Plomo.....	22
1.5.2 Níquel	24
1.5.3 Cadmio.....	25
1.6 Contaminación de sedimentos por metales pesados.	27
1.7 Caracterización y muestreo de sedimentos.....	29
1.7.1 Caracterización físico-química (NOM-021-RECNAT-2000)	29
1.8 Análisis granulométrico	30
1.9 Densidad aparente.....	33
1.10 Densidad real.....	34
1.11 Materia orgánica (MO)	35
1.12 Microscopía electrónica de barrido (MEB).....	36
1.13 Espectroscopia de rayos X de energía dispersiva (EDS)	37
1.14 Espectroscopía de absorción atómica a la flama (EAAF)	37
2. Método.....	39
2.1 Bosquejo del método	39
2.2 Muestreo	40
2.3 Análisis granulométrico	40
2.4 Densidad aparente.....	41
2.5 Densidad real.....	42
2.6 Materia orgánica (MO)	45

2.7 Microscopía electrónica de barrido (MEB) y microanálisis elemental por espectrometría de rayos X de energía dispersa (EDS)	46
2.8 Espectrometría de absorción atómica a la flama	46
3. Resultados	47
3.1 Muestreo	47
3.2 Análisis granulométrico	50
3.3 Densidad aparente	54
3.4 Densidad aeal	55
3.5 Materia orgánica (MO)	57
3.6 Microscopía electrónica de barrido (MEB) y microanálisis elemental por espectrometría de rayos X de energía dispersa (EDS)	59
3.7 Espectrometría de absorción atómica a la flama (EAAF)	70
Conclusiones	74
Referencias	77
Anexos	90

Relación de tablas

Tabla 1.1 Concentraciones de referencia (NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004) ..	20
Tabla 1.2 Métodos y principios en los que se basa el concepto de tamaño de partícula (Pérez & Márquez, 2017).....	33
Tabla 1.3 Valores de referencia para densidad aparente (Ramírez, 1997).	33
Tabla 2.1 Relación de la densidad del agua con la temperatura (NOM-021-RECNAT-2000)	44
Tabla 3.1 Coordenadas de muestreo	48
Tabla 3.2 Porcentajes en peso de los tamaños de partículas	50
Tabla 3.3 Valores de densidad aparente de las muestras de sedimentos.....	54
Tabla 3.4 Valores de densidad real de las muestras de sedimentos.....	55
Tabla 3.5 Resultados de Materia Orgánica (MO)	57
Tabla 3.6 Análisis elemental por EDS de las muestras del lago La Luna	69
Tabla 3.7 Concentraciones de Cd, Pb y Ni en las muestras	71
Tabla A1 Datos utilizados para generar la curva de calibración para Cd	91
Tabla A2 Datos utilizados para generar la curva de calibración para Pb.....	92
Tabla A3 Datos utilizados para generar la curva de calibración para Ni.....	93
Tabla A4 Concentraciones de MO y COT en g/kg	94

Relación de Figuras

Figura 1.1 Exposición de la cadena alimenticia al cadmio (Hamid et al., 2019)....	26
Figura 1.2 Diagrama de textura de suelos USDA (Ciancaglini, 2021)	31
Figura 1.3 Escala de tamaño de partículas (Pérez & Márquez, 2017).....	32
Figura 2.1 Metodología del proyecto	39
Figura 3.1 Ubicación de los puntos de muestreo	47
Figura 3.2 Muestras secas de la época de lluvias 2021: 1) P1S, 2) P2S, 3) P3S, 4) P4S, 5) P1L, 6) P2L y 7) P3L.....	49
Figura 3.3 Triángulo de textura USDA, ubicación de las muestras.....	51
Figura 3.4 Granulometría de sedimentos de los lagos El Sol y La Luna	52
Figura 3.5 Muestras fijadas al porta muestras.....	59
Figura 3.6 Muestras siendo sometidas a baño de oro.....	60
Figura 3.7 Micrografías de las muestras a x30: A) P1L; B) P2L; C) P3L; D) P1S; E) P2S y F) P3S	60
Figura 3.8 Micrografía de la muestra P1Lx500	62
Figura 3.9 Micrografías de la muestra P3Lx500 y P3Lx1500.	62
Figura 3.10 Micrografías de las muestras P3Lx2500 y P2Sx3000.	63
Figura 3.11 Micrografía de la muestra P1Sx500	63
Figura 3.12 Micrografías de las muestras P2Sx500 y P2Sx1500.....	63
Figura 3.13 Micrografía de la muestra P1Sx3500	64
Figura 3.14 Muestra de sedimento del lago La Luna α) P1Lx8000 comparada con β) <i>Psammothidium acidoclinatum</i> (Potapova, 2010).	65
Figura 3.15 Muestra de sedimento del lago La Luna γ) P2Lx8000 comparada con δ) <i>Platessa hustedtii</i> (Potapova, 2011).....	65
Figura 3.16 Muestra de sedimento del lago El Sol ϵ) P3Sx10000 comparada con ζ) <i>Cavinula pseudoscutiformis</i> (Cvetkoska et al., 2014).	66
Figura 3.17 Muestra de sedimento del lago El Sol η) P2Sx5000 comparado con θ) <i>Planothidium lanceolatum</i> (Stancheva et al., 2020).....	66
Figura 3.18 Muestra de sedimento del lago El Sol λ) P3Sx500 comparado con μ) <i>Surirella linearis</i> (Tsukii, 2005).	66

Figura 3.19 Muestra de sedimento del lago El Sol ξ) P3Sx3000 comparado con σ) Caloneis Bacillum (Soler, 2015).	67
Figura 3.20 Muestra de sedimento del lago El Sol τ) P3Sx3000 comparado con ϕ) Cymbella cognata (Rodionova 2013).	67
Figura 3.21 Micrografías de polen de pinus en muestras de sedimento del lago La Luna: G) P1Lx1500 comparada con H) Micrografía de polen de pinus, vista 7a (Bykowska & Klimko, 2015); I) P2Lx1500 comparada con J) Micrografía de polen de pinus, vista 10 (Bykowska & Klimko, 2015)	68
Figura 3.22 Filtrado de la muestra después de la extracción con DTPA	70
Figura 3.23 Espectrómetro de absorción atómica Perkin Elmer “AAAnalyst 200” ...	70
Figura A1 Curva de calibración para Cd	91
Figura A2 Curva de calibración para Pb	92
Figura A3 Curva de calibración para Ni	93

Introducción

Diversas sustancias como los metales pesados llegan a los lagos de alta montaña en forma de partículas suspendidas en la atmósfera, las cuales pueden alcanzar grandes alturas, estas sustancias pueden pasar a formar parte del agua de los lagos, la calidad de estos cuerpos de agua se relaciona con sus sedimentos ya que aquí se pueden retener o no (lixiviarse) esas sustancias.

Los metales pesados representan un problema ya que no se pueden degradar, son bioacumulables y se biomagnifican, pueden ser liberados a la atmósfera de distintas formas como la quema de combustibles fósiles, la actividad industrial y minera igualmente arrojan al ambiente metales tóxicos (Pb, Hg, Cd, As y Cr).

La agricultura y la industrialización son fuentes importantes de emisiones de metales pesados en la zona circundante al Nevado de Toluca, otro factor a tomar en cuenta son las corrientes de aire, debido a su velocidad se tiene una baja movilidad de partículas de contaminantes en el aire por lo que, en época de lluvias, los contaminantes son depositados en la zona.

Considerando lo anterior es posible que los metales pesados lleguen a los lagos El Sol y La Luna e inclusive bioacumularse en las especies que las habitan, además al no existir un monitoreo continuo de contaminantes en estos lagos genera cierta preocupación sobre el estatus de dichos cuerpos de agua. Para verificar el estatus de contaminación de los lagos El Sol y La Luna por metales pesados (Cd, Pb y As) se plantea la obtención de muestras de sedimento en tres puntos diferentes de los dos lagos en distintas épocas climáticas, realizar un análisis granulométrico de las

muestras, determinar las concentraciones de Materia Orgánica en ellas y analizar su contenido de metales (Cd, Pb, y Ni) por espectroscopía de absorción atómica a la flama y EDS. En el primer apartado de este trabajo se muestran los fundamentos teóricos y antecedentes, seguido por la metodología empleada para cada alcanzar cada objetivo, en el apartado 3 se detallan los resultados obtenidos en cada prueba realizada, también se cuenta con un apartado de conclusiones, referencias y anexos.

1. Fundamentos

1.1 Antecedentes

Los trabajos dedicados al estudio de lagos de alta montaña son relativamente escasos, este trabajo toma algunos de ellos como base, también contempla estudios realizados en otro tipo de cuerpos de agua con la finalidad de comparar los estatus de contaminación entre ellos, iniciando con investigaciones realizadas a nivel internacional.

Yang y sus colaboradores en 2007 evaluaron la acumulación de organoclorados y metales pesados en distintas especies de peces en dos lagos (Nan Co [NC] y el Yamdrok [YK]) y un río (Lhasa [Ls]) en la zona del Tíbet; para el lago [NC] se evaluó la especie *Gymnocypris namensis* con valores de 0.61 µg/g para Mn, 0.24 µg/g para As, 0.025 µg/g para Cd y 0.047 µg/g para Pb, en [YK] se evaluó la especie *Gymnocypris waddellii* con valores de 0.24 µg/g para Mn, 0.27 µg/g para As, 0.024 µg/g para Cd y 0.079 µg/g para Pb y por último en el río [Ls] se evaluó la especie *Schizopygopsis microphalis* con valores de 0.49 µg/g para Mn, 0.14 µg/g para As, 0.029 µg/g para Cd y 0.055 µg/g para Pb. Los niveles de metales pesados estuvieron debajo de los marcados por la organización mundial de la salud en 1982, estos resultados validan que esta zona tibetana actúa como zona de convergencia de contaminantes regionales.

Moiseenko y sus dos colaboradores en 1995 analizaron muestras de agua y sedimento de dos lagos (el lago Serdtsevidnoe [SD] y el Chuna-Tundra [CT]) en el norte de la península de Kola, ambos lagos son considerados cuerpos de agua ultra frescos y

oligotróficos, algunos parámetros evaluados en las muestras de agua fueron Ni, Cd y Pb. En las muestras de sedimento las concentraciones de metales pesados se determinaron en un rango de profundidad de 0 a 14 cm para [SD] y de 0 a 18 cm para [CT]: Ni (12 a 79 $\mu\text{g/g}$ [SD] y 15 a 111 $\mu\text{g/g}$ [CT]), Cd (0.98 a 1.63 $\mu\text{g/g}$ [SD] y 0.19 a 1.08 $\mu\text{g/g}$ [CT]), Pb (8 a 27 $\mu\text{g/g}$ [SD] y 8 a 36 $\mu\text{g/g}$ [CT]); los valores más altos en todos los casos se presentaron en la capa más superficial, los autores mencionan que la tasa de sedimentación es aproximadamente 1 mm por año, por lo que los valores indican que el aumento en la acumulación corresponde a 50 años atrás, lo que corresponde a la industrialización de la zona y el incremento de la contaminación global, por último concluyen que la calidad del aire es afectada por la contaminación transfronteriza de la Unión Europea, así como las emisiones regionales, en caso de [CT] presentó una acidez relacionada con la contaminación en capas superiores de la atmósfera mientras en [SD] la acidez se debe a la escorrentía.

Ud Din en 2011 analizó muestras de agua de diversos lagos de alta montaña ubicados en dos distritos de Pakistán (Gilgit y Ghizar) los resultados los comparó contra estándares de la WHO (2008) y USEPA (2009). Los niveles detectados de metales pesados fueron: Cd (<0.5 mg/L), Ni (<0.5 mg/L) y Cr (0.002 mg/L), As (0.003 mg/L) y Pb (0.004 mg/L). Los niveles en la mayoría de muestras las concentraciones de metales pesados están por debajo de los límites, solo en 5% de las muestras las concentraciones de Cd están ligeramente por arriba de ellos.

Pineda en 2009 realizó análisis granulométricos y geoquímicos de los sedimentos marinos superficiales y sub superficiales con la finalidad de determinar la calidad ambiental de ellos y analizar la cantidad de metales contaminantes (Ni, Zn, Pb, Cd, Cu, Hg). El área de estudio está comprendida entre el seno Reloncavi y el Golfo Corcovado, Chile. El contenido de materia orgánica se determinó en los primeros 2 cm de profundidad, estando entre 1.2 y 10.4%. El análisis granulométrico de las fracciones

gruesas y arenas se hizo mediante el método del tamizaje con tamices A.S.T.M., cada $\frac{1}{4}$ phi y la determinación de limos y arcilla se realizó con el método de la pipeta. La nomenclatura de los sedimentos se determinó según los triángulos de clasificación de Folk, perteneciendo los fangos, al limo arenoso, limo, fango y arena gruesa gravosa, estas características indican que derivan de depósitos fluvio-glaciales o morrénicos del Pleistoceno. Los rangos de concentraciones de metales en g/kg fueron: 8.1-56.9 Cu, 34.1-67.4 Zn, 3.5-15.5 Pb, 9.55-165.0 Ni, <.1-3.1 Cd, 2.3-23.2 As y <.02-0.08 para Hg.

Galunin y colaboradores (2014) estudiaron la movilidad de cadmio en sedimentos y suelos de una zona minera de carbón en la cuenca del Río Tibagi, (Brasil) para el cual se tomaron muestras de sedimentos y suelo de distintos lugares cercanos a una mina de carbón, se determinó el carbono orgánico, la cantidad de Al, Fe, Ca, Mg, Mn y Cd. Los valores iniciales en g/kg fueron: Cd 0.02-4.71; Al 0.3-35.2; Fe 0.7-27.08; Ca 0.03-0.51; Mg 0.01-0.87; Mn 0.01-0.50. Las cantidades en meq/L retenidas de cadmio fueron para suelo de 0.23-33.09 y para sedimentos 0.21-30.10, estos valores ya toman en cuenta las concentraciones iniciales, las muestras de suelo tuvieron mejores resultados a comparación de las muestras de sedimento.

Quispe y colaboradores en 2019 determinaron la concentración de metales pesados (cromo, cadmio y plomo) en sedimentos superficiales de la cuenca baja del río Coata (Perú). La determinación fue hecha en dos épocas del año, en avenida y en estiaje del año 2017 en cinco puntos estratégicos. Los rangos de concentraciones fueron de 4.10 - 28.42 mg/kg para Cr, 0.10 - 0.70 mg/kg para Cd, y 3.75 -16.50 mg/kg para Pb. Algunos valores mínimos hallados superan los valores aceptables establecidos en los Estándares de Calidad Ambiental para Suelo del Ministerio del Ambiente del Perú (0.0 mg/kg para Cr, 1.4 mg/kg para Cd, 50 mg/kg para As y 70 mg/kg en caso de Pb.). Las posibles causas de la contaminación detectada son la acción antrópica con impacto en las aguas residuales de la ciudad de Juliaca, Perú.

En 2018 Méndez determinó la concentración de metales pesados en muestras de agua, sedimentos, vegetación y en leche de vaca de la zona del humedal Alto Andino Collotacocha (Recuay, Perú). El monitoreo de la calidad de agua se realizó de acuerdo al “Protocolo Nacional de la Calidad de Cuerpos Naturales de Agua Superficial” de la Autoridad Nacional del Agua (Perú). Para el muestreo vegetación se tuvo en cuenta la guía mexicana NMX- AA-132-SCFI-2006 y el Protocolo de Muestreo de Vegetación y Suelos. La cantidad de metales pesados en sedimento se midió en época de lluvia y de estiaje, las concentraciones más altas se dieron en la época de lluvia, el Al tuvo valores en mg/kg desde 156.40 hasta 778.50, el Fe va desde 1086.00-2111.90, el Mn 392.50-1522.10 y el Pb 105.10-1567.70. En los resultados se encontraron concentraciones elevadas de metales en el sedimento y vegetación, de acuerdo a los resultados de la investigación, se concluye que en el sedimento del humedal de Collotacocha existen metales biodisponibles (Al, Fe, Mn y Pb) con un alto factor de translocación en vegetación y se evidencia una movilidad de los metales al ganado vacuno que se demuestra con la presencia de plomo en la leche.

Escobar en 2019 determinó parámetros fisicoquímicos y niveles de metales pesados en agua y sedimentos en una zona de crianza de truchas, en la bahía de Puno del Lago Titicaca (Perú), se tomaron las muestras en dos puntos, tanto las muestras de agua como las de sedimentos, los sedimentos se tomaron a profundidades de 1, 5, 10 y 15 metros, los metales evaluados en los sedimentos fueron Hg, As, Cd, Pb, Zn, Cu. En el agua se evaluó la temperatura (12.3-17.0 °C); pH (8.24-9.09); NH₃-N (0.03-0.26 mg/L); Oxígeno disuelto (6.00-7.65 mg/L); CO₂ (0.00-1.50 mg/L); Fosfatos (0.00-0.28 mg/L) y nitratos (0.00-0.64 mg/L). Los niveles de metales pesados en mg/kg fueron los siguientes: Hg (0.09); As (41.10); Cd (0.50); Pb (6.00); Zn (28.80); Cu (6.70). El arsénico sobrepasa el límite de tolerancia de la norma canadiense (5.90 mg/kg ISQG). Sin embargo, los metales pesados van acumulándose con el tiempo, llegando a un punto donde es evidente la existencia de efectos biológicos frecuentes, por

consiguiente, compromete la sustentabilidad del lago Titicaca y los procesos de contaminación.

Dentro del territorio mexicano se han realizado estudios dedicados en su mayoría a otros cuerpos de agua y su periferia o suelos de origen volcánico, la mayoría de estos estudios están dirigidos para evaluar el nivel de contaminación en ellos. A continuación, se enlistan algunos de esos trabajos.

Báez y sus colaboradores en 2011 estudiaron tres suelos volcánicos de México, el primero un Acrisol recolectado de Michoacán, el segundo un Andosol, de la misma región y el tercero un tepetate recolectado de Tlalpan (CDMX), el cual fue habilitado para la agricultura. Las muestras se separaron primero, mediante tamizado en húmedo, en dos fracciones: 2000-250 μm (malla #10 y #60) y <250 μm (menor a malla #60). Se midió el carbono orgánico del suelo (COS) en cada fracción mediante combustión seca automatizada. La composición granulométrica de las muestras fue para el Acrisol 10, 37 y 53% de arena, limo y arcilla respectivamente, para el Andosol 33, 51 y 16% y para el tepetate 36, 36 y 28%. En la fracción de mayor tamaño tanto el tepetate como el Acrisol presentaron trazas de COS, mientras en el andosol esta fracción presentó cerca de 2 g C/kg-suelo, en la fracción menor a 250 μm el tepetate tuvo 3.54 g-C/kg suelo, el andosol 34.08 g C/kg-suelo y el Acrisol 18.78 g C/kg-suelo. Se concluyó que la acumulación de COS en cada tipo de suelo estuvo en función de la capacidad de adsorción de las partículas menores a 250 μm (limo y arcilla) y de la proporción relativa de dichas fracciones.

De la Cruz-Landero y sus colaboradores en 2013 analizaron sedimentos de la Laguna de Términos, Tabasco, México, se tomaron en épocas de lluvias y de secas, para la realización de sus análisis tomaron material que pasó por la malla #10. Determinaron

el contenido total de Cd, Pb y Ni, con resultados desde 0.39 a 0.44 mg/kg para Cd, 9.00 a 16.05 mg/kg para Pb, 31.00 a 82.00 mg/kg para Ni. Las concentraciones de cadmio, plomo y níquel encontradas en los sedimentos no sobrepasan los límites permisibles, por la normatividad mexicana. Los sedimentos en el área de influencia de Laguna de Términos, están siendo afectados por la incorporación de elementos contaminantes, principalmente a causa de grandes depósitos de basura y al aporte de aguas residuales tanto de origen doméstico como de índole industrial que al no ser tratados adecuadamente infiltra contaminantes y se deposita en los sedimentos.

Carreño y compañía (2017) evaluaron la toxicidad de los sedimentos del Curso Alto del Río Lerma (CARL) en México, tomaron muestras sobre el río y sus tributarios, a los sedimentos se les determinó el pH y el contenido de carbono orgánico total, además de ser sometidos a un ensayo Microtox; los valores registrados en los sedimentos obtenidos sobre el río fueron: pH dentro del intervalo de 7.11 a 8.21, mientras el Carbono Orgánico Total (COT) fue de 0.8 a 15.2%; mientras que los valores obtenidos en los sedimentos de los tributarios son para pH de 7.17 a 7.28 y para COT de 2.3 a 10.6. Cabe señalar que no se encontraron diferencias significativas ($\alpha > 0.05$) en la toxicidad de los sedimentos entre la época de estiaje y la de lluvia para ambos sedimentos. De acuerdo con la toxicidad obtenida por Microtox®, los sedimentos del CARL y sus principales tributarios se clasifican como extremadamente tóxicos.

Tun y compañía (2017) hicieron un estudio con la finalidad de determinar la presencia y distribución de metales pesados en la zona cañera de la cuenca del Río hondo (Quintana Roo), para lo cual tomaron 10 muestras de sedimentos superficiales de un canal de desagüe y otras 18 de suelos superficiales de un acuífero, en temporada de secas. Las muestras se lavaron con ácido nítrico (acondicionado), se les midió el pH, se determinó la presencia de Hg, Cd, Cu y Fe por espectrofotometría de absorción atómica (MP totales), las lecturas de Cd, Cu y Fe se realizó por aspiración directa con

quemador de flama aire – acetileno y el Hg por un accesorio generador de hidruros. El Fe fue el metal que encabezó los resultados con valores máximos de 27.6 mg/kg, seguido por Cu (10.5 mg/kg), Cd (0.67 mg/kg) y por último el Hg (0.03 mg/kg). Los valores más altos por lo general se observaron en la zona más baja por lo que se puede concluir que estas concentraciones se deben al arrastre que sufren dichos metales.

De la Mora y colaboradores en 2018 tomaron muestras de sedimentos de la presa La Vega (Jalisco, México), la presa se halla a una elevación aproximada de 1261 msnm, la selección de sitios se realizó con ayuda de una imagen satelital. Se analizó el pH, la conductividad eléctrica, el contenido de materia orgánica, macro y micronutrientes. Los resultados mostraron que en la presa La Vega, se tiene un pH que va desde 6.76 a 7.53 (neutro a ligeramente alcalino), presentó un valor medio de conductividad eléctrica de 2.10 dS/m, este valor indica que la salinidad puede disminuir los rendimientos de los cultivos, algunos elementos como es el caso del Fe, Zn, Mn, Cu y B se encontraron en concentraciones muy elevadas, las cuales pueden ser tóxicas al ambiente y al cultivo, el contenido de N proveniente de nitratos, P, K, Ca, Mg, Na y S de sulfatos se encontraron en niveles aceptables.

El área del Nevado de Toluca y sus alrededores son de interés científico como se puede mostrar en los estudios siguientes.

Macías (2005) recopiló información en la que se describe la Faja Volcánica Transmexicana y los volcanes presentes en ella, como lo son: El Volcán de Colima, el cual se ha desarrollado en los últimos 2500 años, el Nevado de Toluca, el Popocatepetl, el Pico de Orizaba, Tacaná y El Chichón. Menciona como el nombre de Xinantécatl (hombre desnudo) que es como también se conoce al Nevado de Toluca puede ser una deformación de Chicnauhtécatl (nueve colinas o nueve cerros), además

menciona que tiene una elevación respecto a la cuenca del río Lerma de 2015 m, así como una columna estratigráfica del Nevado donde destaca la presencia de pómez y varios depósitos de piroclastos.

Armienta 2008 obtuvieron muestras de agua de lagos formados por la actividad volcánica en varias partes de México, registrando sus coordenadas, su elevación, profundidad máxima, el clima, precipitación anual, rango de temperatura del agua y el tipo de lago. Ubicando a El Sol y La Luna a 4200 msnm, con 15 y 10 m de profundidad para El Sol y La Luna respectivamente, así como un intervalo de temperatura de 5 – 12 °C y 6 – 11 °C. Algunos otros lagos mencionados son: Lago verde, Atexcac, el ubicado en el Popocatepetl. En la Luna reportan temperatura del agua de 9.6 – 9.9 °C, pH de 4.9 -5.0 y una conductividad eléctrica de 22 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y en el Sol una temperatura del agua entre 10.3 y 11.6 °C. un pH entre 6.9 y 7.2 y una conductividad eléctrica entre 62 y 64 $\mu\text{S}/\text{cm}$. En el Popocatepetl se registró un valor de pH entre 1.37 y 1.5, en el Chichón el pH fue de 2.29 a 2.44, ambos cuerpos de agua son más ácidos que los del Nevado de Toluca.

Alcocer y sus colaboradores en 2009 indicaron que los sedimentos de los lagos del Nevado de Toluca están compuestos principalmente por cuarzo y fragmentos de roca volcánica y en menores cantidades se halla feldespatos, biotita, moscovita y magnetita. También indicaron que los sedimentos de la periferia de los lagos contienen partículas más gruesas que los hallados en zonas más centrales y profundas, en estas últimas zonas se suele hallar mayor contenido de materia orgánica con un contenido de hasta 24%.

Martínez-Alva y sus colaboradores en 2015 tomaron muestras de suelos agrícolas ubicados en el Nevado de Toluca. Las muestras se tomaron conforme a la NMX-AA-

132-SCFI-2006, se retiraron todos los materiales ajenos (piedras, pasto, etc.). Se determinó textura, pH en agua y KCl, conductividad eléctrica y la capacidad de intercambio catiónico. Los análisis de elementos potencialmente tóxicos se realizaron por espectroscopia de absorción atómica, las concentraciones obtenidas se compararon contra los límites establecidos por la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2007. El valor de pH fue de 3.16 a 4.06, los valores de conductividad eléctrica fueron de 250 a 399 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y el porcentaje de materia orgánica fue de 1.79 a 9.33. Las concentraciones de metales pesados fueron menores a la normatividad, esto lo atribuyeron al desplazamiento de los contaminantes debido a la lluvia combinada con la pendiente del lugar.

Cuna et al. (2015) realizaron mediciones de temperatura, pH, conductividad eléctrica y un estudio sobre las diatomeas presentes en los lagos del Nevado de Toluca. Reportaron un valor de conductividad eléctrica menor a 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$, catalogándolo como bajo. Hallaron la presencia de diatomeas del género *Cavinula*, *Encyonema*, *Navicula*, *Pinnularia*, *Psammothium*, además registraron la presencia de Cladóceros (un suborden de crustáceos con un tamaño máximo de 3mm) como el grupo de *Daphnia longispina*, *Efipios D. longispina*, entre otros. Debido a la acidez de La Luna se observó una mayor abundancia de especies en El Sol; registrando un total de 24 especies repartidas en 24 géneros. Su trabajo confirma que se trata de cuerpos de agua ácidos (pH <7), fríos (T <10 °C) y poco mineralizados (CE <100 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

García-Solorio et al. (2022) realizaron el primer estudio de monitoreo de OCPs (pesticidas organoclorados) y PCBs (bifenilos policlorados) en los lagos El Sol y La Luna, esto debido a que los PCBs y OCP han aumentado los niveles contaminación en todo el mundo, hay estudios que reportan su presencia en zonas tan remotas como el Ártico. El estudio lo realizaron tomando muestras de aerosoles atmosféricos, sedimentos de los lago y organismos de los lagos (plancton y tubifex). El sedimento se

colecto de 3 puntos para cada lago, para la extracción de OCPs y PC-bs de las muestras utilizaron el método EPA 3550B (extracción con n-hexano y acetona grado HPLC). Las concentraciones (pg/g) son las siguientes: endosulfan 2067 (El Sol) y 1633 (La Luna); Clordano 457 (El Sol) y 646 (La Luna) y PCBs 70 (El Sol) 71 (La Luna). La presencia de las sustancias se atribuyó al transporte altitudinal y su aparición en los sedimentos al deshielo y a la lluvia. El endosulfán en los lagos sugiere un uso global y reciente, mientras que la presencia de otros contaminantes se atribuyó a su perseverancia en el medio ambiente por un uso más antiguo.

Cuna et al. (2022) estudiaron la diversidad de fitoplancton en los dos lagos de alta montaña de México (El Sol y La Luna). Hallaron un total de 92 taxones, de los cuales 47 se identificaron como especies y 45 como morfoespecies, debido a las diferencias físicas y químicas entre ambos cuerpos de agua no todos los taxones se encuentran en ambos lagos, como por ejemplo la Navicula NTA se halló en los dos cuerpos de agua, pero la Navicula NTB solo en El Sol. Todos los taxones se hallaron en El Sol y solo 63 de ellos en La Luna. Otros taxones encontrados fueron: Surirella sp., Cavinula pseudocutiformis.

1.2 Lagos de alta montaña

La designación de lago de alta montaña es referente a su ubicación geográfica, destacando solamente el hecho de que se presentan agrupados en terrenos pequeños, con factores naturales homogéneos situados a elevada altitud. Se caracterizan por tener limitadas extensiones territoriales y en ocasiones resalta su profundidad. No tienen un origen en específico, la acción glacial a moldeado a algunos y otros se deben a ella (Margalef, 1949).

Por lo general este tipo de cuerpos de agua se suele hallar en islas con clima frío en zonas tropicales. Gran parte de estos se ubican en la zona de los Andes y en menor cantidad, en el este de África (Löffler, 1964; Payne, 1986, citado por Oseguera et al., 2016).

La ubicación geográfica genera unas condiciones que se suelen considerar como extremas para la mayoría de formas de vida, sin embargo, llegan a existir organismos que están bien adaptados a estas condiciones. Por ejemplo, el agua de estos lagos tiene una cantidad muy baja de minerales y nutrientes ya que se localizan sobre rocas graníticas y en los suelos poco desarrollados (Ventura, 2009).

1.3 Lagos del El Sol y La Luna del Nevado de Toluca (NT)

El Nevado de Toluca o Xinantécatl se ubica a 4645 metros sobre el nivel de mar, a una distancia de 22 km de la ciudad de Toluca, Estado de México, pertenece al parque nacional de los Venados y al parque nacional Nevado de Toluca, que comprende todo el Valle de Toluca y el de Tenango, así como los municipios de Zinacantepec, Calimaya, Tenancingo, Toluca, Tenango del Valle, Villa Guerrero, Coatepec Harinas y Temascaltepec (Montero, 2021).

El NT está en un arco magmático continental denominado Faja Volcánica Transmexicana, el cual está constituido por cerca de 8,000 estructuras volcánicas y algunos cuerpos intrusivos, la faja se extiende desde las costas del Pacífico, en San

Blás, Nayarit y Bahía de Banderas, Jalisco, hasta las costas del Golfo de México en Palma Sola, Veracruz (Gómez et al., 2005).

El Parque Nacional Nevado de Toluca posee rocas de tipo ígneo extrusivo intermedio pertenecientes al Terciario Inferior-superior de la era cenozoica. La litografía superficial permite notar que las rocas más extendidas en el volcán son las pumitas de naturaleza dacítica. La secuencia estratigráfica que se reconoce actualmente permite establecer que el sustrato más antiguo lo constituyen calizas y pizarras del Cretácico, las cuales al colapsarse tectónicamente fueron cubiertas por derrames sucesivos. Sobre estas rocas se acumularon en algunas partes capas de lodo volcánico y cenizas (tobas), así como los lahares o avalanchas de lodo producidas en las erupciones más violentas. Finalmente, encima de estas rocas se depositaron pumitas (piedra pómez) como producto de las erupciones más recientes (Madrigal & González, 1996).

Los extensos bosques templados en torno al Nevado de Toluca, constituyen el principal suministro de servicios ambientales del Valle de Toluca. A pesar de su importancia como resguardo del patrimonio natural del Estado, el parque se ha venido deteriorando como resultado de la intervención humana, los bosques nativos de la región se están siendo amenazados por una marcada tendencia al cambio de uso del suelo y una creciente presión antrópica que repercute en la pérdida de la biodiversidad, en la proliferación de plagas y enfermedades y en la afectación de los suelos (Franco et al., 2009).

Cabe resaltar que en la zona circundante al Nevado de Toluca existen 12 parques industriales registrados ante el Gobierno del Estado de México, a continuación se nombran algunos de ellos, en paréntesis se da su distancia aproximada con el Nevado de Toluca: Parque 2000 (35 Km), Exportec I y II (30 km), El Coecillo (28 km) y el

parque industrial INN (35 km), todos albergan empresas del ramo automotriz, alimenticio, químico y plástico (FIDEPAR, 2021), tomando en cuenta el transporte generado por la actividad industrial se tiene que las emisiones de gases contaminantes a su alrededor son considerables.

Otra actividad importante de la zona es la agricultura, la cual se divide en dos: de temporal y de riego, de hecho, el Estado de México es considerado uno de los mayores productores de flores y plantas ornamentales del país gracias al aprovechamiento del clima que se da en la zona (INEGI, 2001). Sin embargo, el desarrollo de esta actividad promueve la liberación de metales pesados al medio ambiente, así como otras sustancias nocivas, por ejemplo, se ha reportado que algunos agroquímicos como los herbicidas y fertilizantes, tienen metales pesados en ellos, y con su uso periódico se genera una acumulación en la zona o bien son lixiviados a cuerpos de agua subterráneos.

Dentro del cráter se hallan dos cuerpos de agua, los lagos El Sol y La Luna, ambos tienen su origen al quedar tapada la boca eruptiva. Los dos embalses quedan ubicados dentro del término común de “lagos” y se consideran entre los embalses perennes más altos del mundo (Montero, 2021).

El lago de El Sol es más grande de las dos con una dimensión de 400 m. de longitud por 200 m de ancho y una profundidad de 12 m, se encuentra a una altura de 4,209 m.s.n.m. El lago de La Luna es menor, con 200 m de largo por 75 m de ancho alcanzando una altura de 4,216 m.s.n.m. (CEPANAF, 2021). El Sol presenta un pH de 5.5 y La Luna de 4.7 (Caballero, 2020).

De acuerdo al estudio previo de Caballero (2020) los sedimentos de los lagos tienen una composición de: SiO₂ (73.81 – 78.75 %), Al₂O₃ (12.53 – 15.39 %), TiO₂ (0.14 – 0.26 %), Mn (0.01 – 0.04 %), MgO (0.02 – 0.36), CaO (0.77 – 2.16 %), Na₂O (5.67 – 5.25 %), FeO (0.68 – 2.29 %), K₂O (2.51 – 3.99 %) y otros compuestos en forma de trazas (P₂O₅, SrO, Cr₂O₂ y NiO).

A pesar de existir una distancia de 600 m entre ellos y que comparten el mismo origen, clima y régimen hídrico entre ambos lagos se presentan diferencias en sus características físicas y químicas (transparencia de la columna de agua, pH, conductividad eléctrica, entre otras) lo cual se refleja en la biota que alberga cada uno, en El Sol se presenta vegetación bentónica tipo Chara y alberga Trucha arcoíris (Cuna et al., 2022). Se han realizado estudios para identificar diatomeas en los sedimentos de los dos lagos, siendo algunas de estas: *Aulacoseira distans*, *Achnanthis minutissimum*, *Cavinula pseudoscutiformis*, *Encyonema gracile* Rabenhorst, *Encyonema perpusillum*, *Gomphonema angustatum*, *Navicula* NTA, *Pinnularia microstauron*, *P. microstauron* var. *Afasciculata*, *Psammothidium helveticum*, *Psammothidium levanderi*, *Sellaphora* sp., *Staurosira* aff. *venter*, *Staurosira pseudoconstruens*, *Staurosirella pinnata*, *Stenopterobia* sp (Cuna et al., 2015; Cuna et al., 2022).

Esta zona es de gran interés antropológico debido a que restos de cerámica, barras y conos de copal, púas de maguey y maderos con forma de serpientes conocidos como “cetros Tláloc”, de hasta 700 años de antigüedad, han sido hallados en las profundidades del lago El Sol. Estos materiales están relacionados con grupos como los Otomíes, Matlatzincas e incluso Mexicas (INAH, 2012).

1.4 Sedimentos

Los sedimentos se componen por partículas como arcillas, limo y arenas. Los escurrimientos trasladan a los sedimentos, estos al entrar en contacto con los cuerpos de agua disminuyen su calidad por la turbidez generada por las partículas de sólidos suspendidos, lo que resulta que esta agua no se pueda usar en diversas actividades. Los sedimentos pueden ser transportados en forma de suspensión temporal, que dura mientras exista movimiento en el agua que las contiene o en suspensión estable (coloidal), donde solo habrá precipitación después de haber sometido la suspensión a procesos de floculación – coagulación (De la Mora, 2018).

Para poder conocer el desarrollo que ha tenido una región y sus organismos se tiene que estudiar a los sedimentos que la conforman, se debe conocer su fuente de procedencia, el tipo de alteración de las rocas, los mecanismos de transporte y las condiciones de depósito, en otras palabras, las características físicas, químicas y biológicas de los ambientes de depósito y sus variaciones a lo largo del tiempo. Esto es lo que se define como la dinámica de procesos de formación de sedimentos (Pérez & Márquez, 2017).

Existen diferentes ambientes sedimentarios como lo son los ríos, lagunas, playas, dunas, plataformas continentales y cuencas oceánicas, entre otros. Cada uno de estos ambientes tienen una textura y composición única que son producto de la interrelación de los procesos físicos, químicos y biológicos que prevalecen durante el transporte y depósito de las partículas (Pérez & Márquez, 2017).

Los sedimentos tienen componentes clásticos o detríticos, químicos y orgánicos, la mayoría de estudios los analiza a fondo para obtener de este modo la máxima información de cada uno de ellos.

Sedimento clástico. Consisten en fragmentos disgregados, derivados de rocas preexistentes, transportados a otro lugar y redepositados antes de formar otra roca. Las rocas siliciclásticas, tales como conglomerados, arenisca, limolita y lutita, son algunos ejemplos de rocas sedimentarias clásticas comunes. Las rocas carbonatadas también pueden ser disgregadas y reelaboradas para formar rocas sedimentarias clásticas (Schlumberger, 2020).

Sedimento químico. La sedimentación química se produce por precipitación de minerales que se encontraban en disolución. Se originan a partir de los materiales depositados por medios químicos, donde los cristales son mantenidos juntos por uniones químicas o entrelazados unos dentro de otros. Los materiales, ya disueltos, son transportados y concentrados formando minerales que se acumulan en agregados y posteriormente son litificados como en las rocas detríticas, para formar una roca. Casi todas estas rocas se originan por precipitación química en extensiones de agua superficial, ya sea por procesos químicos inorgánicos o por la actividad química de los organismos. A las rocas formadas por la actividad de los organismos se les conoce como rocas sedimentarias bioquímicas (Servicio Geológico Mexicano, 2017).

Sedimentos orgánicos. Están constituidos por residuos, por lo general sólidos, permanentes, provenientes de la descomposición de fuentes orgánicas alóctonas.

Los sedimentos se encuentran constituidos por:

Minerales primarios: corresponden a aquellos minerales formadores de rocas que han sido cristalizados según las condiciones químicas y físicas en las que el magma se solidifica. A altas temperaturas, se encuentran presentes en suelos químicamente inalterados y son esenciales para la clasificación y denominación de las rocas (Moreau, 2013).

Minerales neoformados o secundarios: son aquellos que han sido formados por la reacción entre componentes solubles liberados a partir de un mineral primario o por meteorización de minerales primarios a través de complejos procesos químicos y biológicos (los cuales dependen del clima, pH, Eh, humedad y contenido de materia orgánica) generando nuevos minerales con una composición química distinta a la de sus materiales parentales. Los principales tipos de minerales secundarios son minerales arcillosos aluminosilicatados, oxi-hidróxidos y aluminosilicatos amorfos (Moreau, 2013).

1.5 Metales pesados.

Constituyen un grupo cercano a los 40 elementos de la tabla periódica con una densidad cercana a 5 g/cm^3 . El rasgo distintivo de la fisiología de los metales pesados es que aun cuando muchos de ellos son esenciales para el crecimiento, se ha reportado que también tienen efectos tóxicos sobre las células principalmente como resultado de su capacidad para alterar o desnaturalizar las proteínas.

Su origen puede ser natural (erosión de rocas y minerales metálicos, deposición ambiental) o antropogénica (excavaciones, procesamiento de metales, procesos productivos, urbanización, tratamiento de residuos, fertilización) (Kostka & Lésniak,

2019). Los metales pesados son parte de desechos domésticos, agrícolas e industriales, los cuales son peligrosos para la biota marina, el hombre y el deterioro ambiental en general (Rodríguez & Alvarado, 2015). La contaminación ambiental generada por explotación de un recurso no renovable, como es el petróleo, ocasiona una alta emisión de tóxicos como los metales pesados que con el paso del tiempo afectan la sanidad de diferentes agro-ecosistemas con repercusiones en toda la red trófica. Estas industrias extractivas originan persistencia y acumulación de metales pesados como cadmio (Cd), cromo (Cr), plomo (Pb), vanadio (V), zinc (Zn), mercurio (Hg), entre otros, en suelos y en poblaciones animales y vegetales (Peláez-Peláez et al., 2016).

En la tabla 1.1 se muestran las concentraciones de referencia de metales pesados tomadas de la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004.

Tabla 1.1 Concentraciones de referencia (NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004)

Concentraciones de referencia totales (CRt) para suelo agrícola y residencial			
Contaminante	Concentración (mg/kg)	Contaminante	Concentración (mg/kg)
Arsénico	22	Níquel	1600
Bario	5400	Plata	390
Berilio	150	Plomo	400
Cadmio	37	Selenio	390
Cromo 6	280	Talio	5.2
Mercurio	23	Vanadio	78

Un sedimento puede representar un riesgo para la salud de las personas, cuando al menos una de las concentraciones de los elementos regulados por la NOM-147-

SEMARNAT/SSA1-2004 se encuentre por arriba de las concentraciones de referencia totales, establecidas en la Tabla 1.1. En caso contrario se considerará que el sedimento no requiere de remediación.

Los metales pesados son peligrosos para los humanos y otros tipos de formas de vida, y en su presencia en el ambiente puede causar contaminación de agua y sedimento, deteriorando la estructura del sedimento, destrucción de paisajes ecológicos y disminución de biodiversidad (Bello, 2018).

Estudios realizados sobre concentraciones de varios metales pesados en peces dulceacuícolas del río Magdalena (Colombia), indican que estos organismos tienen la capacidad de almacenar una concentración mayor de estos compuestos en comparación con la presente en el medio, por lo que son un indicador importante de la contaminación; esto implica que su consumo se puede convertir en un problema de salud para las poblaciones que se alimentan de este recurso (Beltrán, 2015).

Los metales pesados pueden inducir cambios bioquímicos en plantas, en especies sensibles causan inhibición en las reacciones fotosintéticas. La gran acumulación de metales pesados genera adaptaciones ecofisiológicas, las cuales han permitido la formación de compuestos bioquímicos proteína-metal llamados metalotioneínas, estas constituyen la familia de metaloproteínas y metal-péptido con bajo peso molecular que son responsables de la regulación interna de micronutrientes como Zn y Cu, además sirven de protección a la célula de los efectos tóxicos de metales como Cd, Hg, Cr (Beltrán, 2015).

Se estima que a nivel mundial por lo menos 2.35 millones de km² de tierra agrícola se encuentra contaminada por trazas de metales (Hamid et al., 2019).

En los sedimentos los metales que contaminan ambientes acuáticos se encuentran típicamente enlazados con los sedimentos del fondo y el análisis de la distribución espacial permite el seguimiento de los metales evaluar la pureza geoquímica de los depósitos e identificar las posibles fuentes de contaminación (Kostka & Lésniak, 2019).

Los factores que influyen en la movilización de metales pesados en los sedimentos son:

- Características del sedimento: pH, potencial rédox, composición iónica de la solución del sedimento, capacidad de cambio, presencia de carbonatos, materia orgánica, textura, etc.
- Naturaleza de la contaminación: origen de los metales y forma de deposición.
- Condiciones medioambientales: acidificación, cambios en las condiciones rédox, variación de temperatura y humedad (Méndez, 2018).

1.5.1 Plomo

En la naturaleza raramente se encuentra en estado elemental (Pb⁰), por lo general se suele encontrar de forma monovalente (Pb¹⁺), divalente (Pb²⁺) y tetravalente (Pb⁴⁺), siendo el más común el divalente. El plomo puede formar compuestos organometálicos

como es el tetraetilo de plomo $(\text{CH}_3\text{CH}_2)_4\text{Pb}$, que era la fuente individual más grande de Pb a la atmósfera antes hasta 1990, cuando se utilizó como aditivo antidetonante en gasolina (CCME, 1999a).

El plomo, es un xenobiótico que no es necesario para el organismo humano, para ninguna función fisiológica conocida, pero sus efectos adversos inciden sobre diferentes procesos bioquímicos esenciales, e incluso es tóxico a bajo niveles de exposición (Rodríguez et al., 2016).

Los efectos adversos para el plomo en la base de datos de efectos biológicos para sedimentos del Environment Canadá de 1998 incrementa la mortalidad, disminuye la abundancia y diversidad de invertebrados, así como su desarrollo anormal (CCME, 1999a).

El plomo se encuentra en la litosfera y, está presente en la corteza terrestre en una cantidad aproximada de $15 \mu\text{g/g}$. También puede encontrarse formando sulfuro de plomo PbS (galena), carbonato de plomo PbCO_3 (cerusita) y sulfato de plomo PbSO_4 (anglesita). El plomo es un metal casi inmóvil y estaría adsorbido en sitios no saturados de ríos, materiales arcillosos y materia orgánica. Cuando se incrementa el valor de pH puede precipitar como plomo $\text{Pb}(\text{OH})_2$. En mayor proporción el Pb que se encuentra en el ambiente proviene de actividades mineras (Vásquez, 2019).

Existen compuestos inorgánicos del plomo, como el óxido y dióxido de plomo, que se usan en la fabricación de pinturas y compuestos orgánicos que son liberados al aire durante la combustión del carbono y aceite. Una vez en la atmósfera, las partículas de plomo pueden viajar a grandes distancias contaminándose suelos, ríos, lagos y

lagunas. Este incremento de plomo en el medio ambiente se facilita también por la explotación minera junto a otros metales, así como el aumento de fábricas que procesan plomo o sus componentes (Rodríguez et al., 2016).

1.5.2 Níquel

Es un metal plateado, duro pero quebradizo, su conductividad térmica al igual que su conductividad eléctrica es alta. Suele incendiarse espontáneamente con el aire al estar en forma de polvo. Por lo general se presenta en un estado de oxidación de 2^+ pero también puede existir en 1^- , 0 , 1^+ , 3^+ y 4^+ . Debido a su radio iónico semejante al de otros metales como el hierro y zinc puede reemplazar metales esenciales causando alteraciones en las rutas metabólicas (CCME, 1999b).

El níquel dentro de los sistemas acuáticos puede tener diversos orígenes desde la erosión de rocas y los propios ciclos biológicos hasta procesos industriales, como la fabricación de pinturas y/o tintes y la obtención de fertilizantes (Olivares-Arias et al., 2015) también cabe destacar que se suele usar como enchapado, cátodos, metal para aleaciones y para acuñar monedas (CCME, 1999b).

Al ser absorbido por la piel llega a producir dermatitis con inflamación, la exposición crónica puede generar cáncer nasal y/o pulmonar, también impacta a nivel hormonal, se han llevado estudios donde en dos grupos de mujeres se analizó su impacto en la tasa de abortos espontáneos y por otro lado su efecto en la degeneración testicular de roedores (Kas, Das, & Dhundasi, 2008, citado por Olivares-Arias et al., 2015). También se ha observado bronquitis crónica, disminución de la función pulmonar, esto en

trabajadores de refinerías de níquel, lugares donde se llega a respirar polvo que contiene compuestos de níquel (ATSDR, 2005).

1.5.3 Cadmio

El cadmio es un elemento no esencial que se halla en forma natural en la corteza terrestre. Su fuente de provisión más relevante a la atmósfera es la actividad volcánica continental al igual que el vulcanismo profundo de los océanos (Espósito et al., 2017).

Este metal es considerado como el más móvil en el ambiente acuático y una de sus principales características es que es bioacumulativo y persistente en el ambiente con una vida media de 10 a 30 años, se suele encontrar en aguas superficiales y subterráneas y tiende a acumularse en el suelo (Hernández, 2014).

El British Geological Survey reportó una producción aproximada de cadmio en 2015 de 24,900 toneladas (Hamid et al., 2019).

Cabe destacar que el cadmio es un elemento que puede pasar del suelo a los cuerpos acuíferos subterráneos, ya que puede ser arrastrado como lixiviado, amenazando la vida acuática presente o el riesgo de que sea introducido en la red trófica, de ahí nace la importancia de retenerlo antes de que esto suceda, en la figura 1.1 muestra el proceso que lleva a cabo el cadmio para ser ingerido por los seres humanos.

En elevadas concentraciones resulta tóxico para la vida, tiene afinidad con partículas de materia orgánica por lo que es fácil que entre a los sistemas acuáticos y se deposita en los sedimentos, también suele asociarse con partículas de hierro e hidróxidos de manganeso o por precipitación de soluciones con carbonato o sulfato (CCME, 1999c).

El cadmio es perjudicial para órganos y tejidos como son: riñón (disfunción renal, tubular, proteinuria e insuficiencia renal crónica), corazón (arterioesclerosis aórtica y coronaria, incremento en colesterol y ácidos grasos); huesos, testículos, placenta y sistema nervioso central y periférico (Vásquez, 2019).



Figura 1.1 Exposición de la cadena alimenticia al cadmio (Hamid et al., 2019).

1.6 Contaminación de sedimentos por metales pesados.

Las fuentes principales de contaminantes en sedimentos son:

- Las descargas directas de instalaciones industriales en los cuerpos de agua, el agua residual de tratadoras, descarga de agua de lluvias o la combinación de estos flujos.
- Derrames químicos.
- Escorrentías superficiales o erosión del sedimento de terrenos inundables y otras fuentes contaminadas en tierra como vertederos de basura, instalaciones de almacenamiento de químicos, minas y pilas de desperdicio de minas y áreas de agricultura o urbanas.
- Emisiones de aire de plantas de poder, incineradoras, aplicaciones de pesticidas u otras fuentes que pueden transferirlos a un cuerpo de agua través de precipitación o deposición directa.
- Filtración de aguas subterráneas contaminadas o líquidos en fase no acuosa en los cuerpos de agua.
- Disposición directa de barcos atracados y en dique seco, o liberación de contaminantes de estructuras en el agua y estructuras sobre el agua o instalaciones de mantenimiento de barcos (EPA, 2005).

- Arrastre atmosférico de emisiones de contaminantes desde áreas cercanas e inclusive con un origen transfronterizo las cuales son depositadas el ambiente (Yang et al., 2007).

Una de las desventajas de utilizar la calidad de los sedimentos como indicador de los efectos en la vida silvestre es que no se han desarrollado pautas de residuos en los tejidos para la protección de la vida silvestre para muchas sustancias químicas de posible preocupación (EPA, 1996).

La presencia de metales en el ambiente marino-costero puede deberse a la actividad antrópica y/o a procesos naturales, tales como la meteorización, erosión de las rocas y actividad volcánica. Algunos metales como Mn, Fe, Cu y Zn son micronutrientes esenciales, otros tales como el Hg, Cd y Pb no son requeridos ni siquiera en pequeñas cantidades por los organismos. Todos los metales, en concentraciones relativamente altas, son tóxicos para los organismos acuáticos y para los hombres (Pineda, 2009).

Los ríos son receptores de residuos generados por las actividades humanas, a través de efluentes que aportan sustancias peligrosas, especialmente metales como plomo, cadmio, cromo, mercurio y manganeso, entre otros, los cuales suelen depositarse en el sedimento, y estar suspendidos o disueltos en la columna de agua, estos ríos transportan los contaminantes a lo largo de su cauce y cuando desbordan pueden depositarlos en cuerpos de agua, como lagunas y manantiales (Flores et al., 2018).

Referente a ríos se tiene el Curso Alto del Río Lerma (CARL), el cual es un cuerpo de agua que debido a las descargas de aguas residuales urbanas e industriales no tratadas que recibe ha sobrepasado su capacidad de asimilación y dilución, por lo que

se ha provocado su eutrofización, así como que el índice de calidad para la pesca y protección de la vida acuática sea inaceptable. Dadas las condiciones de bajo caudal y anoxia, es probable que los contaminantes se estén depositando, lo que ocasiona que los sedimentos del CARL se consideren como extremadamente tóxicos. Estas condiciones adversas han propiciado la alteración de las cadenas tróficas y la desaparición de peces, ajolotes y plantas, sobreviviendo solamente aquellos que son altamente resistentes como el lirio acuático (*Eichhornia crassipes*), lentejilla (*Lemna sp.*) algunas especies de nemátodos, artrópodos, sanguijuelas, gasterópodos, plancton, entre otros (Carreño et al., 2017).

1.7 Caracterización y muestreo de sedimentos

Debido a que en las normas oficiales mexicanas manejan la siguiente definición: “Suelo: material no consolidado, de origen natural, compuesto por partículas inorgánicas, materia orgánica, agua, aire y organismos, que incluye aquél alterado por actividades antropogénicas”, y recordando que las muestras de sedimentos para este proyecto son del tipo no consolidados, los cuales se componen de arcillas, arenas y gravas se toman los parámetros de las normas NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 y NOM-021-RECNAT-2000 para evaluarlas.

1.7.1 Caracterización físico-química (NOM-021-RECNAT-2000)

Algunas de las principales determinaciones analíticas para evaluaciones de fertilidad consideradas en la NOM son:

- pH: Medido en agua.
- Densidad aparente y real.
- Determinación del contenido de boro.
- Contenido de materia orgánica.
- Retención de humedad.
- Contenido de humedad del suelo.
- Fósforo extraíble.
- Análisis granulométrico.
- Determinación de la textura del suelo.
- Nitrógeno inorgánico.
- Contenido de micronutrientes disponibles (Fe, Mg, Zn y Cu) y metales contaminantes (Pb, Cd y Ni).
- Capacidad de intercambio catiónico y cationes intercambiables.

1.8 Análisis granulométrico

Una de las propiedades físicas de mayor significado para conocer las condiciones hidrodinámicas que rigen el depósito de los sedimentos es el tamaño de la partícula (textura), frecuentemente denominada como: arena, limo o arcilla (el diagrama de textura de la USDA puede ser de utilidad para ello, el cual se muestra en la figura 1.2). Igualmente, es importante determinar la distribución de los tamaños en el ambiente, toda vez que son variables que frecuentemente determinan la mayoría de otras propiedades sedimentarias, por ejemplo, las relacionadas con la velocidad de sedimentación, conductividad hidráulica, porosidad y grado de clasificación, entre otras (Pérez & Márquez, 2017). Su velocidad de sedimentación puede alcanzar valores típicos del orden de 1, 10 y 100 m/día, respectivamente. Los procesos de depósito son afectados por el nivel del agua, el tiempo de residencia, la temperatura, la morfometría y la cantidad de sedimento previamente depositado en el embalse (Arias & Ramírez, 2009). Todos los métodos de medidas de tamaño son empíricos debido a que el

tamaño no puede ser definido con precisión; aun empleando formas geométricas simples se puede llegar a influir en los resultados (Pérez & Márquez, 2017).

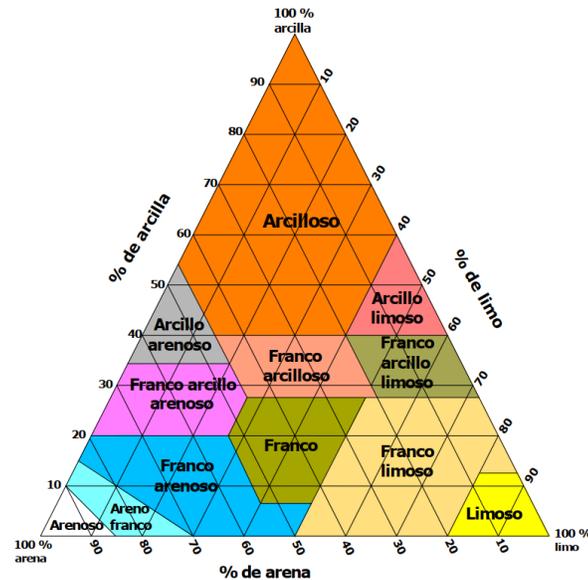


Figura 1.2 Diagrama de textura de suelos USDA (Ciancaglini, 2021)

Para determinar el tipo de partícula con base a su tamaño se puede utilizar como guía la figura 1.3, en la cual sus autores (Pérez & Márquez, 2017) hacen uso del tamaño de partículas en mm y su equivalencia en escala Phi. Esta escala fue adoptada internacionalmente para la clasificación granulométrica de partículas sedimentarias. Fue propuesta en 1922 por Wentworth, basándose en la anterior escala de J. A. Udden, de 1898. La escala parte de 1 mm y, dividiendo o multiplicando por 2, en sentido decreciente o creciente de tamaño respectivamente, define los límites de diámetro de cada clase (Geoxnet, 2016).

		Phi	(m.m)
PEÑASCO		-8	256
GUIJARRO		-7	128
MATATENA		-6	64
		-5	32
		-4	16
		-3	8
		-2	4
GRÁNULO		-1	2
ARENA	MUY GRUESA	0	1
	GRUESA	1	$\frac{1}{2}$
	MEDIA	2	$\frac{1}{4}$
	FINA	3	$\frac{1}{8}$
	MUY FINA	4	$\frac{1}{16}$
LIMO	GRUESO	5	$\frac{1}{32}$
	MEDIO	6	$\frac{1}{64}$
	FINO	7	$\frac{1}{128}$
	MUY FINO	8	$\frac{1}{256}$
ARCILLA	GRUESA	9	$\frac{1}{1024}$
	MEDIA	10	$\frac{1}{4096}$
	FINA	11	$\frac{1}{16384}$
	MUY FINA	12	$\frac{1}{65536}$

Figura 1.3 Escala de tamaño de partículas (Pérez & Márquez, 2017)

Los autores Pérez y Márquez proporcionan algunos métodos para la determinación del tamaño de partícula, los cuales se muestran en la tabla 1.2.

Tabla 1.2 Métodos y principios en los que se basa el concepto de tamaño de partícula (Pérez & Márquez, 2017).

Método de medida	Nombre	Definición
Tamizado	Diámetro del tamiz	Ancho de la abertura del mínimo cuadrado a través de la cual pasa la partícula
Sedimentación	Diámetro de caída libre	Diámetro de una esfera que tiene la misma velocidad de caída que una partícula en un fluido de densidad y viscosidad unitaria.
	Diámetro de Stokes	Diámetro de caída libre en un flujo laminar
Microscopio	Diámetro nominal	Diámetro de un círculo de la misma área que la proyección de una partícula.

1.9 Densidad aparente.

Este parámetro determina el volumen de una fracción de sedimento considerando el espacio poroso existente y es importante para el manejo de las muestras debido a que refleja el nivel de compactación, filtración y circulación de gases. La densidad aparente varía principalmente debido a la textura y el contenido de materia orgánica (Taboada & Álvarez, 2008). A continuación, se muestran valores de referencia para la prueba de densidad aparente.

Tabla 1.3 Valores de referencia para densidad aparente (Ramírez, 1997).

Porosidad total (%)	Densidad aparente (g/mL)	Porosidad total (%)	Densidad aparente (g/mL)
<31	>1.8	47 – 54	1.2 – 1.4
32 – 39	1.6 - 1.8	55 – 62	1.0 – 1.2
40 – 46	1.4 - 1.6	>63	<1.0

Una densidad aparente alta indica compactación, la cual limita la capacidad de aireación, infiltración de agua y crecimiento de raíces, en tanto que si la densidad aparente es baja indica una adecuada capacidad de aireación, drenaje e intercambio gaseoso (Coyote, 2021).

1.10 Densidad real

La densidad real se refiere al peso del material sólido (sin considerar el espacio poroso ni materia orgánica) que compone al sedimento, constituye la masa de una unidad de volumen de partículas sólidas de él, se expresa en g/mL (Ramírez, 1997).

Determinar esta variable puede permitir estimar la composición mineralógica de la muestra, el peso de sus componentes es variado, por ejemplo, valores menores de 2.5 g/cm³ pueden indicar mayor contenido de materia orgánica y yeso; de 2.5 a 3.0 arcillas, cuarzo, feldespatos, calcitas, micas; de 3.0 a 4.0 limonitas, piroxenos, olivinos y mayor de 4.0 mayor contenido de hematitas y magnetitas (De acuerdo a Beltrán et al., 2021, citado por Coyote, 2021).

Se considera mayormente que los componentes del suelo poseen una densidad oscilante entre 2.6 y 2.7 g/cm³ y se toma un valor medio de 2.65 g/cm³. (De acuerdo con Beltrán et al., 2021, citado por Coyote, 2021).

1.11 Materia orgánica (MO)

La materia orgánica son las cadenas de carbono e hidrogeno que pueden incluir en su estructura moléculas de oxígeno, nitrógeno o cualquier otro elemento y son originadas por los organismos vivos (Pérez & Márquez, 2017). Para que la vegetación se pueda desarrollar de forma adecuada el contenido de materia orgánica debe oscilar entre un 2 % y un 6 % (Broadbent, 1953, citado por Martínez, 2008).

Un mayor contenido de materia orgánica proporciona una mayor retención de nutrientes lo cual se ve reflejado por medio de la capacidad de intercambio iónico (Intagri, 2022).

La sedimentación de la materia orgánica en ambientes acuáticos depende de diversos factores como lo es la presencia de oleaje (en caso de costas), corrientes, la densidad y su concentración. Las condiciones físicas, químicas y biológicas influyen en gran medida en la descomposición de la materia orgánica, por ejemplo, en condiciones donde hay escasas de oxígeno se llega a formar amoníaco, ácido sulfhídrico, bióxido de carbono y metano lo que perjudica a la vida acuática (Galindo et al., 1984). Dependiendo del grado de descomposición que presenta la materia orgánica se puede clasificar como lábil o como húmica, la lábil puede ser digerida fácilmente por los microorganismos ya que están compuestas por carbohidratos, ligninas y ácidos grasos, mientras la húmica se suele encapsular en agregados lo que dificulta su acceso y al estar compuesta de ácidos fúlvicos, ácidos húmicos y huminas permanece más tiempo sin alteraciones ya que estas sustancias presentan mayor estabilidad en su composición (FAO, 2022).

La materia orgánica en una muestra puede ser cuantificada de dos formas: por medio de calcinación de las muestras y químicamente; el primer método se basa en cuantificar la pérdida de peso que sufre la muestra al ser sometida a una combustión seca, el procedimiento presenta variaciones con la temperatura y tiempo de combustión manejados (Pérez & Márquez, 2017); el segundo método presenta mayor reproducibilidad (Ambientum, 2022) además que estudios como el de Izquierdo-Bautista & Arévalo-Hernández (2021) demuestran que tiene menos desviación al haber comparado ambos métodos. Ambos métodos implican la destrucción de la muestra ya sea vía química o térmica y dependiendo del proceso de destrucción utilizado este se puede clasificar como semi cuantitativo o cuantitativo (Ramos et al., 2015).

1.12 Microscopía electrónica de barrido (MEB)

La microscopía electrónica de barrido produce imágenes de una muestra barriéndola con un haz de electrones, permitiendo estudiar la topografía superficial de muestras sólidas. Se basa en la emisión termoiónica de un haz de electrones primarios a partir de un filamento de tungsteno. Éstos son colimados hacia la muestra con una serie de lentes electromagnéticas. Cuando la muestra es bombardeada por el haz de electrones, se generan electrones secundarios, electrones primarios retrodispersados, rayos X característicos de los átomos presentes en la muestra, absorción de electrones y electrones Auger (Moreira & Julián, 2017). Las muestras no conductoras deben ser recubiertas con una capa de material conductor (generalmente oro o plata), para evitar que se carguen superficialmente.

1.13 Espectroscopia de rayos X de energía dispersiva (EDS)

Es una técnica analítica que permite la caracterización química/análisis elemental de materiales. Una muestra excitada por una fuente de energía (como el haz de electrones de un microscopio electrónico) disipa parte de la energía absorbida expulsando un electrón de núcleo. Un electrón de capa exterior de mayor energía continúa ocupando su posición, liberando la diferencia de energía como un rayo X que tiene un espectro característico basado en su átomo de origen. Esto permite el análisis de composición de un volumen de muestra específico excitado por la fuente de energía. La posición de los picos en el espectro identifica el elemento, mientras que la intensidad de la señal corresponde a la concentración del elemento (Thermo Fisher Scientific, 2021).

1.14 Espectroscopía de absorción atómica a la flama (EAAF)

La espectroscopia de absorción atómica es una técnica extremadamente sensible, y específica debido a que las líneas de absorción atómica son considerablemente estrechas (de 0.002 a 0.005 nm) y las energías de transición electrónica son únicas para cada elemento, su sensibilidad está en el orden de mg/kg. La instrumentación básica está constituida de una fuente de radiación monocromática (específica para cada elemento a analizar), o policromática, un atomizador para producir los átomos excitados de la sustancia a analizar; un monocromador para seleccionar la longitud de onda de la radiación característica de cada elemento a analizar; un detector sensible a la radiación emitida y un procesador de la señal y de la lectura de salida (Gallegos et al., 2012).

En términos generales, el funcionamiento es el siguiente: el haz emitido por la fuente atraviesa el sistema de atomización que contiene la muestra en estado de gas atómico, ésta llega al monocromador que elimina la radiación que no interesa para el estudio, pasando así al revelador o detector de la radiación absorbida, que luego es procesada y amplificada, dando como resultado una lectura de salida (Gallegos et al., 2012).

2. Método

2.1 Bosquejo del método

En la siguiente figura se muestra el método que fue utilizado en este proyecto

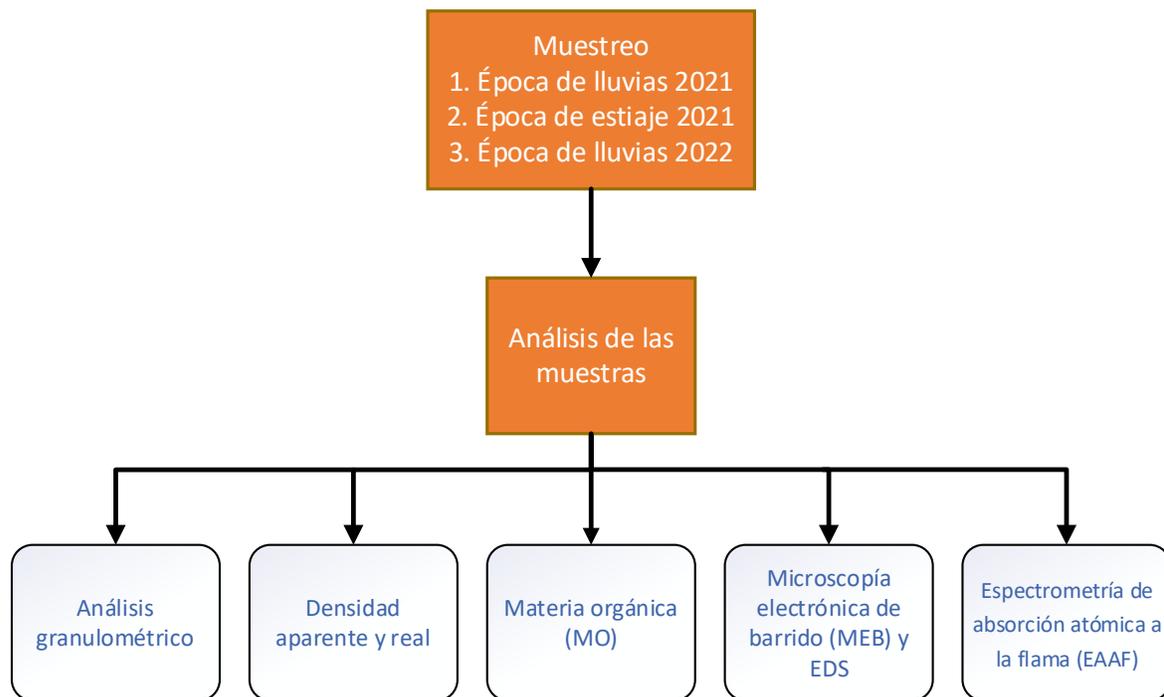


Figura 2.1 Metodología del proyecto

2.2 Muestreo

El procedimiento aplicado fue de muestreo no probabilístico, inducido y por conveniencia, las muestras se tomaron a un margen de 1 metro de la orilla de los lagos, en este proyecto se procedió a tomar tres muestras sencillas de cada lago, la profundidad como lo dicta la NMX-AA-132-SCFI-2016 fue 30 cm a partir de la superficie.

El secado de la muestra se realizó a temperatura ambiente cubriendo la muestra para evitar que se contaminara, para lo cual se extendió sobre una superficie tratando de que el tamaño de la capa de muestra no superara un centímetro para que se ventilara de forma adecuada, posteriormente se golpeó con un mazo de goma para eliminar los terrones formados sin afectar a las partículas.

2.3 Análisis granulométrico

Con la finalidad de obtener un espaciamiento uniforme de los puntos se siguió el método utilizado por Mendoza en 2013 el cual contempla los tamices: #4, #8, #16, #30, #50, #100 y #200 (por disponibilidad en el laboratorio se sustituyó la malla #50 por la malla #60).

El tamizado es un método muy poco práctico para determinar la distribución de tamaños de partículas inferiores a malla #200 (0.074 mm). Por lo tanto, para realizar la determinación del contenido de estas partículas finas se suele recurrir a un ensayo

de sedimentación en agua (En la NOM-021-RECNAT-2000 se realiza con ayuda de un Hidrómetro de Bouyoucos y una probeta de 1000 mL).

2.4 Densidad aparente

Para la obtención de este parámetro se siguió el procedimiento dictado por Coyote (2021) el cual consistió en:

- Pesarse una probeta de 25 mL y agregar la muestra hasta la marca de 10 mL.
- Asentar la muestra dando pequeños golpes sobre una superficie lisa.
- Volver a llenar hasta la marca de 10 mL y repetir los pequeños golpes para que se vuelva a asentar la muestra.
- Repetir el paso anterior si es necesario.
- Pesarse la probeta con la muestra de suelo.

El cálculo se hizo con la siguiente ecuación

$$\text{densidad aparente } \left(\frac{g}{mL} \right) = \frac{\text{peso de la probeta con muestra (g)} - \text{peso probeta (g)}}{\text{volumen de la muestra (mL)}} \dots\dots \text{Ec. (1)}$$

2.5 Densidad real

Esta prueba se tomó de la NOM-021-RECNAT-2000.

Se realizó previamente la destrucción de la materia orgánica de la muestra, lo cual está indicado en la norma. Este procedimiento radicó en:

- Tomar 100 g de suelo seco y tamizado a través de una malla de 2 mm y colocarlo en un vaso de precipitado de 1 L, agregar agua destilada hasta cubrir la muestra.
- Verter 10 mL de peróxido de hidrógeno al 6% y agitar con el agitador de vidrio durante 10 minutos.
- Verter otros 10 mL de agua oxigenada.
- Colocar el vaso en la parrilla eléctrica o plancha eléctrica ubicada dentro de la campana de extracción y caliente hasta 90°C.
- Verter 10 mL de agua oxigenada.
- Continuar calentando para eliminar el exceso de agua oxigenada, por un tiempo de 45 minutos.
- Introducir el recipiente a una estufa para secar a 105°C hasta tener peso constante.
- Sacar la muestra, vaciarla a un mortero, molerla y tamizarla por el tamiz #10.

El procedimiento para determinar la densidad real de las muestras consistió en:

- Pesar un matraz limpio y seco (1).
- Colocar 5 gramos de la muestra en el matraz.
- Anotar el peso del matraz con la muestra (2).
- Adicionar agua destilada hasta la mitad del volumen de matraz y girarlo con mucha suavidad y colocarlo en el desecador de vacío.
- Hacer vacío durante 15 minutos para eliminar todo el aire retenido en la muestra. La succión de la bomba se aumentó paulatinamente para evitar pérdidas de material por la formación de espuma.
- Dejar reposar dentro del desecador por 30 minutos y eliminar el vacío del desecador paulatinamente, sacar el matraz y llenar hasta aforo con agua destilada, secar perfectamente el exterior y pesar en la balanza analítica (3).
- Tomar la temperatura de la suspensión.
- Vaciar el matraz, enjuagarlo perfectamente y llenarlo hasta aforo con agua destilada.
- Pesar el matraz con agua y tomar la temperatura, anotarla (4).

Para los cálculos se toman las siguientes ecuaciones:

Peso de las partículas del suelo (p_s)

$$p_s = (2) - (1) \dots \text{Ec. (2)}$$

Volumen de las partículas del suelo (V_s)

$$V_s = \frac{(4)-(1)}{p_w} - \frac{(3)-(2)}{p_w} = \frac{\text{peso del agua desplazada por la muestra}}{\text{densidad del agua}} \dots \text{Ec. (3)}$$

Densidad real (d_s)

$$d_s = \frac{p_s}{V_s} \dots \text{Ec. (4)}$$

La norma también incluye valores de la densidad del agua a distintas temperaturas, para sustituirlos en el procedimiento anterior, algunas de ellas se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 2.1 Relación de la densidad del agua con la temperatura (NOM-021-RECNAT-2000)

Temperatura (°C)	Densidad del agua (g/cm ³)
16	0.999
18	0.998
20	0.998
22	0.997

2.6 Materia orgánica (MO)

El contenido de MO puede ser medido indirectamente a través del carbono orgánico total (COT), por tanto, para determinarlo se siguió la marcha analítica de acuerdo con ISO 14235:1998 presentada y modificada por Ramos y colaboradores en 2015. La metodología descrita en la norma internacional ISO 14235:1998 está fundamentada en el método Walkley-Black, en la cual el carbono orgánico total presente en la muestra se oxida en una mezcla de solución de dicromato de potasio en exceso y ácido sulfúrico a una temperatura de 135°C. Los iones dicromato $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ se reducen a iones Cr^{3+} cuya absorbancia es cuantificada espectrofotométricamente a una longitud de onda de 585 nm (Ramos et al., 2015).

Antes de realizar la prueba en la muestra, se debe realizar una curva de calibración, para ello se ocuparon estándares a partir de una solución de sacarosa.

Para iniciar el proceso se secó, molió y tamizó la muestra, se pesó un gramo de la muestra y se colocó en un tubo de ensayo. Se le agregó $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ (2.5 mL) y H_2SO_4 (3.75 mL), de gota en gota, debido a que la reacción es demasiado violenta, se tapó el tubo y se agitó cuidadosamente, después se colocó en una parrilla de calentamiento (pre calentada) a 135°C por 30 minutos, trascurrido este tiempo se dejó enfriar para poder manipular los tubos y el contenido de cada tubo se colocó en un matraz volumétrico de 50 mL y se procedió a aforar con agua desionizada, se mezcló bien y una porción cercana a 10 mL se centrifugó a 3600 rpm por 10 minutos; en algunas muestras existió la presencia de partículas en suspensión por lo que se procedió a filtrarlas, para poder proceder a medir su absorbancia con ayuda de un espectrofotómetro a una longitud de onda a 585 nm y con ayuda de la curva de calibración se determinó la cantidad de COT en la muestra. Conforme lo marcado en

la NOM-021-RECNAT-2000, con el valor recabado anteriormente y la ecuación 5 se calcula la concentración de materia orgánica (MO). El valor de 1.724 es el factor de Van Benmelen, este valor resulta de la suposición de que la MO contiene un 58% de carbono, por lo tanto, al dividir 1 entre 0.58 da como resultado 1.724 .

$$MO (\%) = 1.724 * COT * \frac{1}{10} \quad \text{Ec. (5)}$$

2.7 Microscopía electrónica de barrido (MEB) y microanálisis elemental por espectrometría de rayos X de energía dispersa (EDS)

Para esta prueba se tamizó la muestra con la finalidad de obtener la parte más fina de la muestra, se colocó una muy pequeña porción de polvo fino sobre cinta de cobre previamente fijada al portamuestras. Las muestras se analizaron utilizando un microscopio electrónico de barrido marca Jeol, modelo JSM-6610LV acoplado a un sistema de espectroscopía de energía dispersiva (EDS).

2.8 Espectrometría de absorción atómica a la flama

Como lo marca la NOM-021- RECNAT-2000 se siguió el método AS-14, que corresponde a una extracción con DTPA. Primero la muestra se tamizó a un número de malla 10, una porción de 10.0 gramos se colocó en contacto con DTPA 0.005 M en agitación por un tiempo de 2 horas, al terminar el tiempo se procedió a filtrar, de igual forma se realizó el procedimiento para un blanco, en el extracto que se obtuvo fue posible cuantificar los metales de interés con un espectrómetro de absorción atómica Perkin Elmer “AAAnalyst 200”.

3. Resultados

3.1 Muestreo

Para el primer muestreo (época de lluvias 2021) en cada lago se recolectaron tres muestras de sedimentos, cada muestra con un peso aproximado de 1 kg, las cuales se colocaron en bolsas plásticas y se colocaron en un recipiente para su traslado. Para los siguientes muestreos se consideró un punto extra en El Sol (P4S). Las ubicaciones propuestas de los puntos se muestran en la figura 3.1, esta distribución se eligió por las condiciones de los lagos.

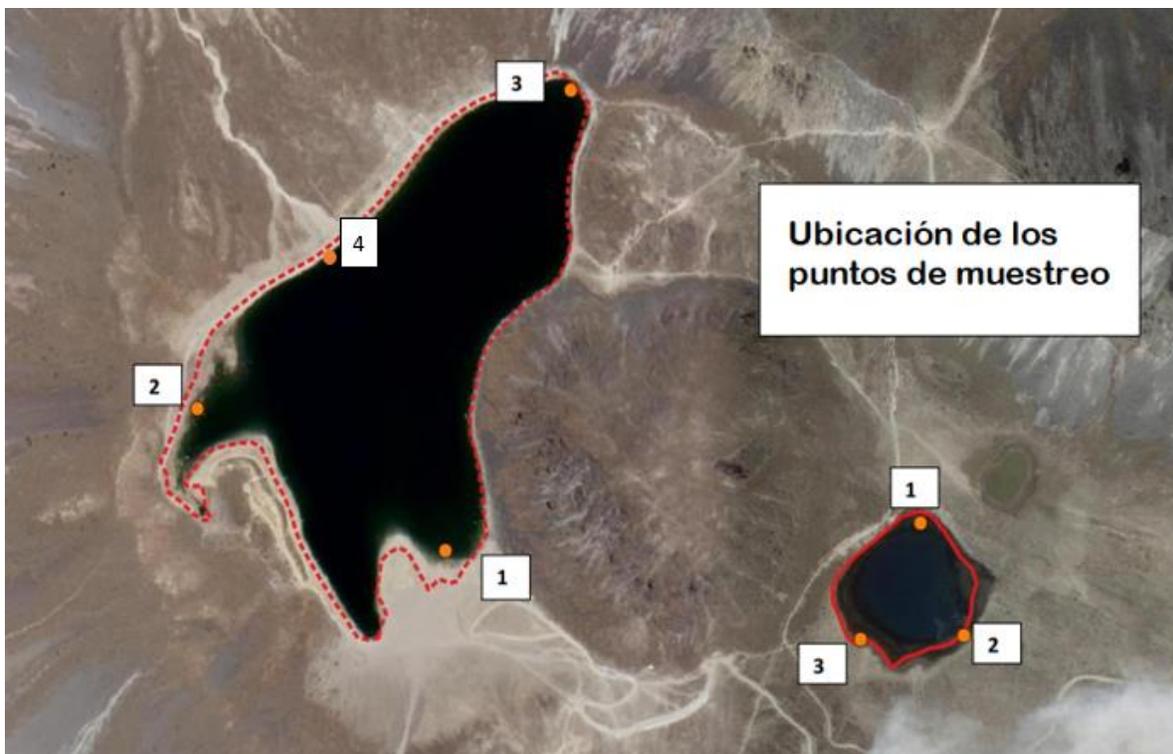


Figura 3.1 Ubicación de los puntos de muestreo

Los puntos de muestreo tuvieron las coordenadas de la tabla 3.1, las cuales se verificaron por medio de un GPS marca Garmin modelo eTrex 10.

Tabla 3.1 Coordenadas de muestreo

Punto de Muestreo		Identificación de muestra	Latitud (N)	Longitud (O)
El Sol	1	P1S	19°6'27.13"	99°45'31.23"
	2	P2S	19°6'33.09"	99°45'43.13"
	3	P3S	19°6'46.64"	99°45'25.41"
	4	P4S	19°6'40.50"	99°45'36.7"
La Luna	1	P1L	19°6'28.40"	99°45'8.70"
	2	P2L	19°6'23.64"	99°45'6.63"
	3	P3L	19°6'23.44"	99°45'11.57"

Como se puede ver en las imágenes presentadas en la figura 3.2 las muestras tienen matices de colores variados, para los sedimentos del lago El Sol los tonos son claros en las muestras P1S y P2S, mientras la P3S es aún más clara que estas dos. Todas las muestras de La Luna tienen una coloración oscura, esto se puede relacionar a la composición de cada muestra.

Tomando en cuenta las particularidades de cada punto de muestreo se puede dar una idea de las características de las muestras, por ejemplo: en el lago El Sol el punto uno está junto a un cumulo de rocas, por lado el lago La Luna es de un tamaño más reducido, todo el lago está rodeado de rocas de forma homogénea, por lo que se esperaría que esto se vea reflejado en los resultados de los análisis consecutivos.

A continuación, se muestran las muestras secas de cada punto de ambos lagos.



Figura 3.2 Muestras secas de la época de lluvias 2021: 1) P1S, 2) P2S, 3) P3S, 4) P4S, 5) P1L, 6) P2L y 7) P3L

3.2 Análisis granulométrico

El arreglo de tamices quedó de la siguiente forma: #8 (2.38 mm), #16 (1.19 mm), #30 (0.595 mm), #60 (0.250 mm), #100 (0.149) y #200 (0.074 mm). En la tabla 3.2 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 3.2 Porcentajes en peso de los tamaños de partículas

Fracción	Malla	Muestras (%W)						
		P1L	P2L	P3L	P1S	P2S	P3S	P4S
Gravas	8	21.0	28.9	18.2	17.5	28.0	46.3	59.2
Arenas	16	19.3	10.6	17.5	13.0	15.4	13.8	12.7
	30	20.4	14.1	20.5	15.9	14.5	10.9	7.5
	60	27.8	33.8	25.3	35.7	19.5	15.4	8.9
	100	8.3	8.3	13.0	10.7	13.0	9.0	5.3
	200	2.0	2.9	3.1	4.0	4.7	3.0	2.5
Arcilla y limo	finos	1.2	1.4	2.4	3.2	4.9	1.6	3.9
Total		100	100	100	100	100	100	100

La malla 8 representa a la fracción de gravas, fue la fracción con mayor porcentaje de retención para todas las muestras, siendo el valor más bajo el punto P1S con 17.54%, el valor más alto se presentó en P4S (59.17%), lo cual puede deberse a que se trata de un punto de escorrentía principal por lo que llega material que no ha sufrido el mismo tipo de erosión como el resto de puntos, después se encontró un valor de 46.28% correspondiente al punto P3S el cual se ubica junto a un cúmulo de rocas lo que puede justificar este valor. Los puntos con mayor cantidad de la fracción retenida por la malla 16 son dos de La Luna: P1L y P3L, con valores de 19.30 y 17.52%. Referente a la malla 30 se repite lo anterior con valores de 20.40% para P1L y 20.54% para P3L, los cuales son muy semejantes. En la fracción retenida por la malla 60 se encuentra el valor más alto en El Sol, en P1S con 35.67%, seguido de P2L con 33.84%. La fracción retenida por la malla 100 tiene

valores semejantes en La Luna, de igual forma en tres muestras de El Sol, con excepción de P4S. Para la última malla (#200) todas las muestras arrojan valores menores a 5%. El resto de la fracción de las muestras (finos) corresponde tanto a limos como a arcillas y de igual forma para todas las muestras son valores menores a 5%.

Para determinar la textura de cada muestra se debe tomar en cuenta solo los tamaños de partícula ≤ 2.00 mm (malla #10), por las limitaciones de material para este trabajo se consideró desde la malla 16 en adelante.

Tomando en cuenta lo anterior se puede decir que todas las muestras tienen por lo menos el 90% de su composición perteneciente a la fracción arena, por lo que al utilizar el cuadro de textura de la USDA no importa el contenido de arcillas o limos, se observa que todas las muestras presentan una textura “Arenosa” (figura 3.3)

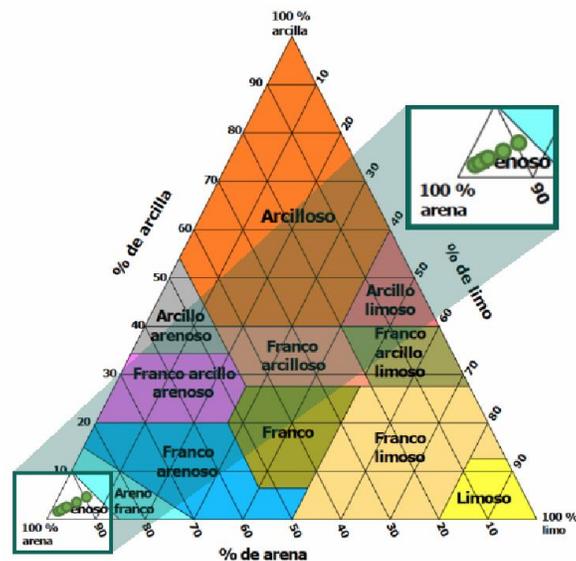


Figura 3.3 Triángulo de textura USDA, ubicación de las muestras

Una vez obtenidos los datos, se procedió a graficar el tamaño de las partículas contra el porcentaje presente de cada tamaño, lo anterior se agrupo por muestra para poder apreciar de mejor forma su composición (figura 3.4).

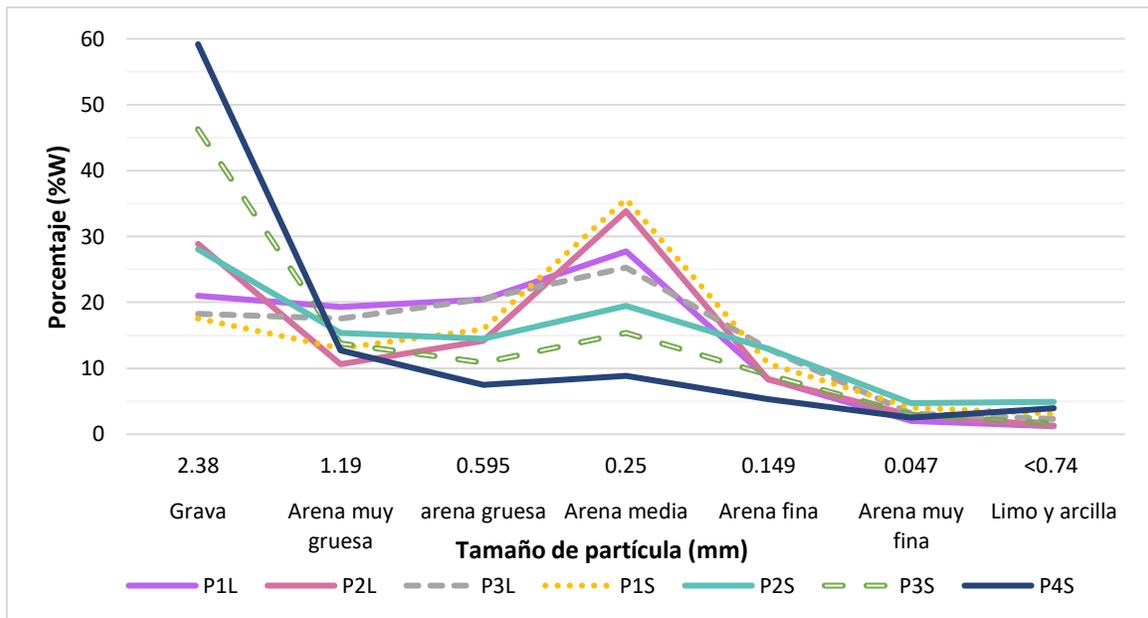


Figura 3.4 Granulometría de sedimentos de los lagos El Sol y La Luna

A primera vista se nota que los sedimentos de La Luna tienden a tener una distribución semejante en los 3 puntos a diferencia a los puntos de El Sol, donde se observa que en su punto 4 se tiene la mayor concentración de partículas con tamaño de ≥ 2.38 mm y en el punto 1 se tiene el mínimo, también cabe remarcar que en La Luna se tiene una fracción fina (partículas con tamaño menor a 0.074 mm) que ronda entre 1 y 2%, mientras que los sedimentos de El Sol tiene un valor ligeramente mayor, el cual va desde un poco más de 1.5 hasta casi 5%. Esto puede deberse a que las muestras al ser de las orillas no han sufrido el mismo grado de erosión como las que son arrastradas al interior de los cuerpos de agua, ya que en el trabajo de García-Solorio (2022) tomó sedimentos de zonas más centrales de los mismos lagos en estudio arrojando valores de partículas finas (limo y arcilla) desde 38.7

hasta 79.1%, arenas de 20.1 a 67.4%, y con porcentajes muy bajos las gravas que van de 0.7 a 1.8%.

Estos resultados son muy distintos a los reportados en sedimentos marinos superficiales del seno Reloncavi (Chile) por Pineda en 2009, en sus muestras se encontraron valores muy pequeños de arenas (menos de 2%), con proporciones de limo y arcillas semejantes (limo entre 50 y 56%, arcilla entre 41 y 49%), en su caso la presencia de finos puede deberse a la erosión de depósitos litorales cercanos, que luego son arrastrados hasta una depresión en el fondo marino, el cual sirve como una trampa. Algo muy distinto al caso de las muestras del Nevado de Toluca donde la morfología de las partículas obtenida por MEB arroja que las partículas sedimentarias tienen una distancia de transporte corta y puede que gran parte de la erosión en las partículas al estar fuera de los lagos se deba a la acción del viento y lluvia; así como la ocasionada al desprenderse e ir chocando con otras partículas a su paso al ser desplazada por acción de la gravedad desde un punto exterior del cuerpo de agua hasta un punto dentro del lago.

En el lago Titicaca (Velazco & Solís, 2009) abundan las arenas (54.82 – 90.78%), seguidas de los finos (8.06 – 43.63%) y por último las gravas (0 – 10.10 %), siendo semejantes con los de NT en el contenido de arenas, en el lago Titicaca poco más del 40% de esas partículas son fragmentos calcáreos de moluscos algo que no puede ocurrir en el NT por sus condiciones.

También se cuenta con información de los sedimentos del Río Tibagi (Brasil), del trabajo de Galunin en 2014, en este caso los papeles se invierten, presentándose un mínimo de partículas finas (limo y arcilla) de 90.4 %, en este caso se puede suponer que las partículas sufren una mayor erosión por parte de las corrientes de agua las cuales no son equiparables con las de los cuerpos de agua en estudio.

Otras muestras con las que se pueden comparar son de tres suelos del Eje Neovolcánico Transversal de México, los cuales son usados con fines agrícolas. Báez et al. (2011) reportó composiciones de partículas más diversa con hasta 36% de arenas (Tepetate), 51% de limo (Andosol) y 53% de arcillas (Acrisol), esto se ve reflejado con una diversidad de texturas. Debido a los porcentajes tan distintos las propiedades como la permeabilidad cambian en comparación de las muestras del presente trabajo, si las muestras del Nevado de Toluca llegarán a ser usadas con fines agrícolas puede que la vegetación no se desarrollara de la misma forma que lo hace en esos suelos.

3.3 Densidad aparente

Las pruebas se realizaron por duplicado, arrojando valores dentro del rango de 1.30 a 1.43 g/mL, siendo los valores más alto los registrados en P1L y P3L, el valor más bajo se registró en P1S con 1.16 g/mL, el promedio de La Luna es de 1.42 g/mL y para El Sol el valor promedio baja a 1.29 g/mL, los valores de todas las muestras están en la tabla 3.5. De acuerdo a la tabla 1.3 (sección 1), las muestras del lago de La Luna presentan una porosidad entre 40 y 54%, y los de El Sol 47 a 54 % para los puntos 2, 3 y 4, solo en el punto uno el valor sube entre 55 y 62%.

Tabla 3.3 Valores de densidad aparente de las muestras de sedimentos.

Muestra	Densidad promedio (g/mL)	Porosidad Total (%)
P1L	1.43 ± 0.03	40 - 46
P2L	1.39 ± 0.02	47 - 54
P3L	1.43 ± 0.03	40 - 46
P1S	1.16 ± 0.01	55 - 62
P2S	1.40 ± 0.02	47 - 54
P3S	1.30 ± 0.03	47 - 54
P4S	1.34 ± 0.01	47 - 54

Estos valores son semejantes a los reportados por Rueda (2017), cabe destacar que en su trabajo utilizaron sedimentos de la Laguna Limoncocha (Ecuador), sus valores reportados oscilan entre 0.58 a 1.30 g/mL, con una media de 0.94 g/mL, clasificándolos con una buena capacidad de drenaje y porosidad (según la tabla 1.3 tienen una porosidad total arriba del 63%), ninguna de las muestras de este trabajo alcanzó esos valores. También podemos comparar los valores con los reportados por Ratto et al. (2010), de igual forma sus muestras fueron sedimentos de río, el Reconquista (Buenos Aires, Argentina), estas muestras presentaron densidades aparentes de entre 0.77 y 1.29 g/mL, esto indica que poseen un alto contenido de arcillas, en su caso se observó la presencia de grietas en la superficie del sustrato, en el caso de las muestras de este trabajo de acuerdo al análisis granulométrico el contenido de partículas finas es muy bajo.

3.4 Densidad real

Todas las muestras al ser sometidas al pretratamiento, en el momento de agregar el peróxido de hidrógeno se presentó una muy leve efervescencia, lo cual se relaciona con un bajo contenido de materia orgánica (esto se puede comprobar con el contenido de MO). La prueba arrojó valores más elevados que la densidad aparente. En la tabla 3.4 se muestran los valores obtenidos.

Tabla 3.4 Valores de densidad real de las muestras de sedimentos

Muestra	Densidad Promedio (g/mL)	Muestra	Densidad Promedio (g/mL)
P1L	2.47 ± 0.02	P1S	2.52 ± 0.04
P2L	2.40 ± 0.23	P2S	2.52 ± 0.01
P3L	2.61 ± 0.09	P3S	1.87 ± 0.87
-	-	P4S	2.56 ± 0.06

Los 3 puntos registrados de La Luna tienen valores muy homogéneos, los cuales se encuentran entre 2.4 y 2.6 g/mL con desviaciones estándar pequeñas, lo mismo ocurre con los puntos 1, 2 y 4 de El Sol (sus valores son 2.51, 2.52 y 2.55 g/mL, respectivamente), pero en el punto 3 la densidad real baja hasta 1.87 g/mL, además presenta la desviación estándar más amplia de todos los puntos, esto lo podemos relacionar al alto contenido de partículas de mayor tamaño (mostrado en los resultados de granulometría), ya que producen mayores espacios de aire y con la variedad de tamaños de las partículas en la muestra de ese punto se podría explicar la razón de la desviación estándar tan amplia.

Al momento de realizar la prueba, las muestras de La Luna y los puntos 1, 2 y 4 de El Sol tendían a compactarse fácilmente, caso contrario con el punto 3 de El Sol, ya que al momento de realizar la prueba las partículas de mayor tamaño presentes no permitían que las partículas de menor tamaño se compactaran, además existe la posibilidad de que el espacio con aire fue más alto debido a que las partículas de mayor tamaño presentaban huecos dentro de ellas (pudiendo ser material pumítico, para comprobar esto se tiene que hacer otro tipo de caracterización como difracción de rayos X, lo cual queda fuera del alcance de este proyecto).

La media para los sedimentos de La Luna fue de 2.50 g/mL y para los de El Sol 2.30 g/mL, un valor ligeramente más abajo.

Estos valores fueron mayores a los reportados por Ratto et al. (2010) para sedimento del río El Reconquista, teniendo como rango 1.7 y 2.16 g/mL con una media de 2.0 g/mL, en su caso el valor lo comparan con 2.65 g/mL el cual es considerado como promedio para la mayoría de minerales de la corteza terrestre (de acuerdo con Krauskopf, K.B., 1967, citado por Ratto et al., 2010), su valor promedio lo atribuyen a la presencia de compuestos no identificados.

Al comparar los valores con los reportados por Rueda (2017) de la Laguna Limoncocha (Ecuador), se observa que los valores son semejantes ya que se encuentran en el rango de 2.34 y 2.78 g/mL, con una media de 2.56 g/mL.

3.5 Materia orgánica (MO)

La curva de calibración que se realizó presenta la ecuación $y = 0.0525x + 0.0363$ y un coeficiente de determinación $R^2 = 0.991$. Las concentraciones de carbono orgánico total y materia orgánica se muestran en la tabla 3.5.

Tabla 3.5 Resultados de Materia Orgánica (MO)

Materia orgánica (%) en sedimentos de los lagos La Luna y El Sol			
Muestra	Época de lluvias 2021	Época de estiaje 2021	Época de lluvias 2022
P1L	0.718 ± 0.011	0.561 ± 0.008	0.319 ± 0.008
P2L	0.486 ± 0.031	0.456 ± 0.022	0.427 ± 0.008
P3L	0.505 ± 0.005	0.333 ± 0.005	0.777 ± 0.011
Promedio	0.570 ± 0.016	0.450 ± 0.012	0.507 ± 0.009
P1S	0.683 ± 0.003	0.636 ± 0.028	1.050 ± 0.010
P2S	1.059 ± 0.002	0.459 ± 0.028	0.337 ± 0.031
P3S	1.070 ± 0.026	0.441 ± 0.011	0.086 ± 0.016
P4S	N/D	0.679 ± 0.011	0.177 ± 0.007
Promedio	0.937 ± 0.008	0.554 ± 0.020	0.412 ± 0.016

N/D = No Determinado

En general se puede apreciar como existe una menor cantidad de MO en el lago de La Luna, ya que la mayoría de promedios altos y los picos de concentración se presentaron en El Sol. En el primer muestreo el valor más alto se presentó en P3S, en el segundo en P4S y en el tercero en P1S, en los tres muestreos no se detecta un patrón claro sobre qué zona presenta siempre la concentración más baja o más

alta de MO, esto se puede explicar con ayuda del trabajo de García-Solorio (2022) ya que analizó sedimentos de zonas más internas de los lagos El Sol y La Luna hallando desde 2.5 a 61.5% de MO, por tanto, se puede deducir que gran parte de este material termina siendo arrastrado a zonas más céntricas de los cuerpos de agua.

Al comparar este rubro con los valores de suelos de origen volcánico terminan siendo menores a los reportados en el trabajo de Báez et al. (2011), en el cual se reportó un valor promedio de 4.73% en un tipo de suelo Andosol, 0.54% en un tepetate y 2.06% para un suelo del tipo Acrisol.

También se pueden comparar con valores registrados en el lago Titicaca (Velazco & Solís, 2009) los cuales llegan a tener valores entre 1.78 y 28.40% de materia orgánica con un promedio de 10.11%, lo cual queda muy por encima de los valores de este trabajo.

Los valores de materia orgánica de este estudio son muy pequeños de los reportados en suelos de uso agrícola y sedimentos de la cuenca del río Lerma, siendo ambas zonas colindantes al Nevado de Toluca, los valores en suelo rondan el 9.33% (Martínez-Alva et al., 2015), mientras en sedimentos llega hasta el 15.2% (Carreño et al., 2017).

Al contener menos de 4.0% de MO de acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2000 todas las muestras se clasifican con un contenido de materia orgánica “muy bajo”.

3.6 Microscopía electrónica de barrido (MEB) y microanálisis elemental por espectrometría de rayos X de energía dispersa (EDS)

Esta técnica se realizó con la fracción fina resultante de tamizar la muestra de sedimento con una malla #100, las muestras se fijaron en el portamuestras con cinta de cobre (figura 3.5).

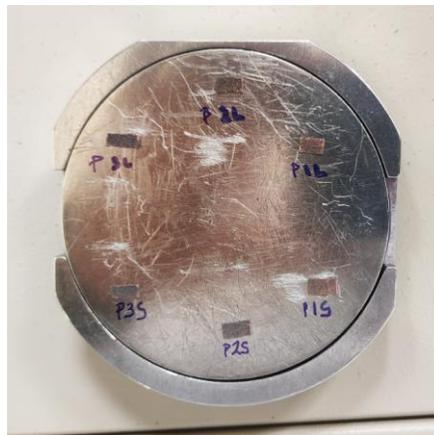


Figura 3.5 Muestras fijadas al porta muestras

Una vez fijadas se sometieron a baño de oro (figura 3.6) a 30 mA por 40 segundos.



Figura 3.6 Muestras siendo sometidas a baño de oro

Al observar las muestras con el microscopio electrónico de barrido se usaron diferentes niveles de aumento para las muestras, los cuales van desde x30 hasta x10,000. A continuación, se muestran las micrografías de ambos lagos a x30 (figura 3. 7).

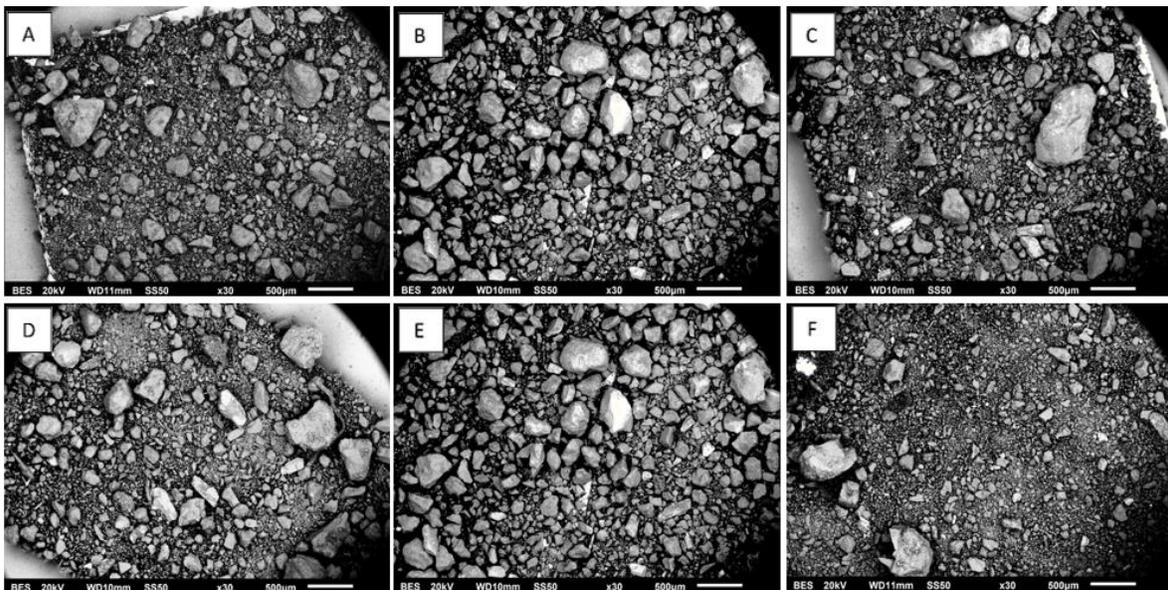


Figura 3.7 Micrografías de las muestras a x30: A) P1L; B) P2L; C) P3L; D) P1S; E) P2S y F) P3S

Las micrografías A, C, D y F presentan la misma tendencia del contenido de partículas, abundan las ≤ 0.1 mm, seguidas por las de 1 a 5 mm y por último las ≥ 5 mm. La micrografía F exhibe una gran concentración de partículas de tamaño ≤ 0.04 mm (arenas muy finas, limo y arcillas) indicando un menor grado de permeabilidad que el resto de muestras. En las micrografías B y E hay una mayor proporción de partículas de entre 1 y 5 mm, en la micrografía B en segundo lugar están las ≤ 1 mm y tercero las ≥ 5 mm, estos dos puestos se intercambian en la micrografía E. Las partículas de tamaños ≤ 1 mm (rocas microcristalinas) se asemejan a gránulos esferoides, las partículas de mayor tamaño son gránulos amorfos con cierto grado de rugosidad, sub angulares y con baja esfericidad, tienen cantos con baja erosión generada por medio donde se hallaban. Lo anterior indica que estas partículas sedimentarias han sido transportadas por distancias muy cortas, teniendo su origen en la misma zona donde se recolectaron (Warrier et al., 2016). Debido a los aumentos usados en las partículas no se aprecia la presencia de poros, los cuales, si son visibles en rocas faneríticas, como la pumita que se pueden hallar en el volcán (García-Palomo et al. 2002).

En las siguientes figuras se exponen las micrografías de ambos lagos obtenidas a mayores aumentos que van desde x550 hasta x10,000.

En la micrografía de la figura 3.8 se observa que la partícula de mayor tamaño se asemeja a material similar a cuarzo de acuerdo a Hoyos et al. (2015), esto por su forma irregular y la textura de apariencia lisa que presenta un cierto grado de corte. Las micrografías de la Figura 3.9 muestran una partícula con aumentos de x500 y x1500, respectivamente que de acuerdo a Restrepo et al. (2007) corresponde a material pumítico por la cantidad de poros que contiene. Las micrografías de los puntos P3Lx2500 y P2Sx3000 (figura 3.10) se asemejan a arcillas, debido a las capas laminares muy marcadas que se presentan, como se pueden ver en los trabajos de Gómez et al. (2011) y Franco & Maspoch (2009). La micrografía

subsecuente (figura 3.11) parece tener una partícula de feldespato por su estructura firme conformada por capas muy compactas como las mostradas por Net & Limarino (2000). Las partículas de las micrografías de la figura 3.12 son similares a lo que Alvarado et al. (2016) muestran como ceniza volcánica debido a la textura aparente de su superficie y los bordes angulares muy marcados de las partículas. En la última micrografía de los minerales (figura 3.13) se aprecian distintas partículas de diversas formas, donde destaca la abundancia de arcillas, así como el resto de una microalga.

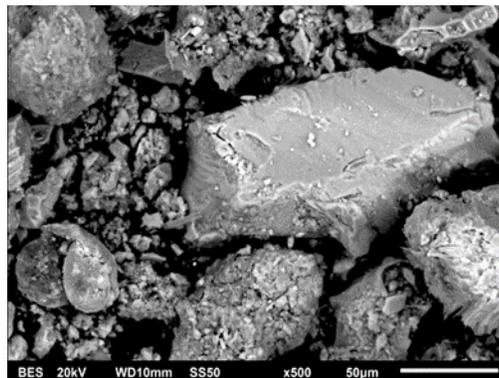


Figura 3.8 Micrografía de la muestra P1Lx500

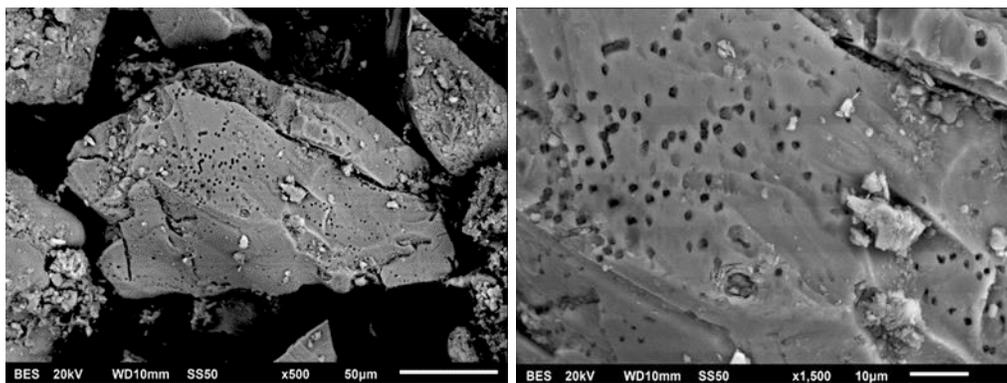


Figura 3.9 Micrografía de la muestra P3Lx500 y P3Lx1500.

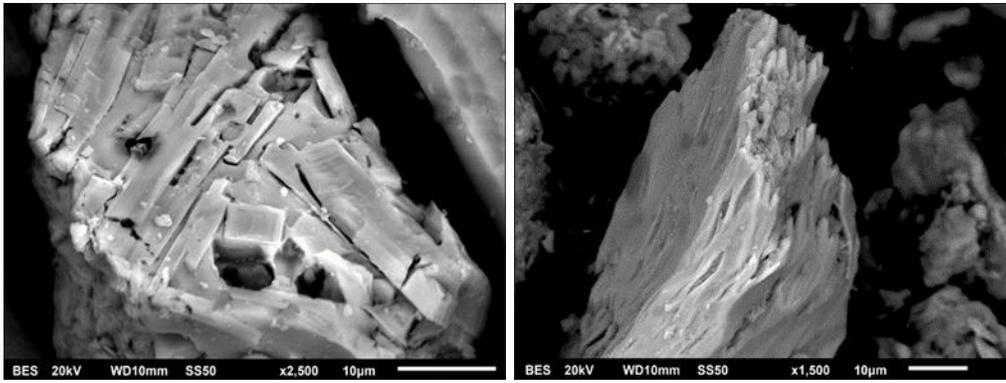


Figura 3.10 Micrografías de las muestras P3Lx2500 y P2Sx3000.

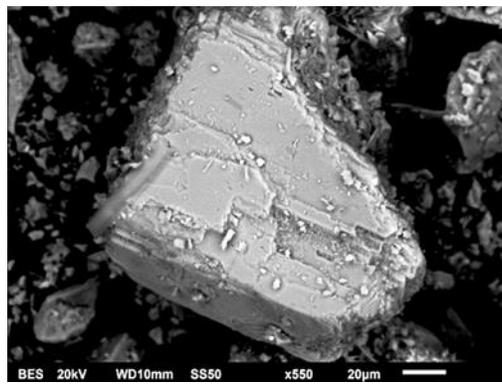


Figura 3.11 Micrografía de la muestra P1Sx500

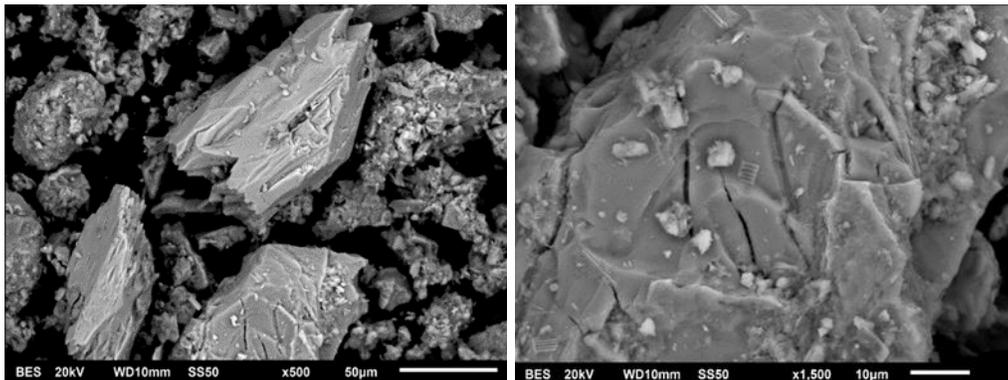


Figura 3.12 Micrografías de las muestras P2Sx500 y P2Sx1500

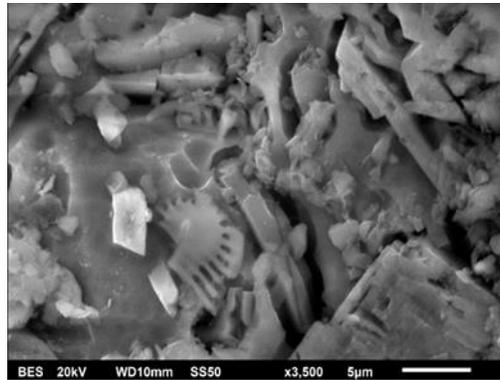


Figura 3.13 Micrografía de la muestra P1Sx3500

En las muestras de sedimentos se examinó la presencia de diatomeas. De acuerdo a las publicaciones especializadas y la base de datos diatoms.org se presume que las diatomeas encontradas pertenecen al género *Psammothidium* (figura 3.14), *Platessa* (figura 3.15), *Cavinula* (figura 3.16), *Planothidium* (figura 3.17), *Surirella* (figura 3.18), *Caloneis* (figura 3.19) y *Cymbella* (figura 3.20). Todas las diatomeas mencionadas anteriormente se ilustran junto con algunas que sirvieron de referencia para poder identificar su género. Con anterioridad Cuna y colaboradores en 2015 y 2022 reportaron en los lagos del Nevado de Toluca la presencia de diatomeas del género: *Aulacoseira*, *Cavinula*, *Encyonema*, *Navicula*, *Pinnularia*, *Psammothidium*, *Stenopterobia* y *Surirella*, entre otros, en coincidencia con ellos en este trabajo se identificaron tres géneros: *Surirella*, *Cavinula* y *Psammothidium*, coincidiendo con la distribución geográfica de las microalgas que los autores manejan.

Es importante resaltar que las diatomeas tienen la capacidad de sorber metales ya sea ligándolos a su superficie celular o de forma intracelular (Hernández-Ávila et al., 2017, citado por Kiran-Marella et al., 2020), los cuales pueden llegar a presentar hasta el 10% de la biomasa de la diatomea. Esta propiedad ha sido evaluada tanto en biomasa viva como no viva, para el primer caso se cuenta con la publicación de Santos et al. (2012) en estudiaron la adsorción de Cd en diatomeas (*Nitzschia palea*), mientras para el segundo caso se tiene el trabajo de Muñoz-Olivas et al. (2007), en donde evalúan el uso de tierra de diatomeas para la remediación de

aguas. Por tanto, se recomienda la realización de un estudio que se enfoque solo a verificar la existencia de estos contaminantes en las diatomeas con la finalidad de evaluar el impacto antropogénico que llegan a presentar.

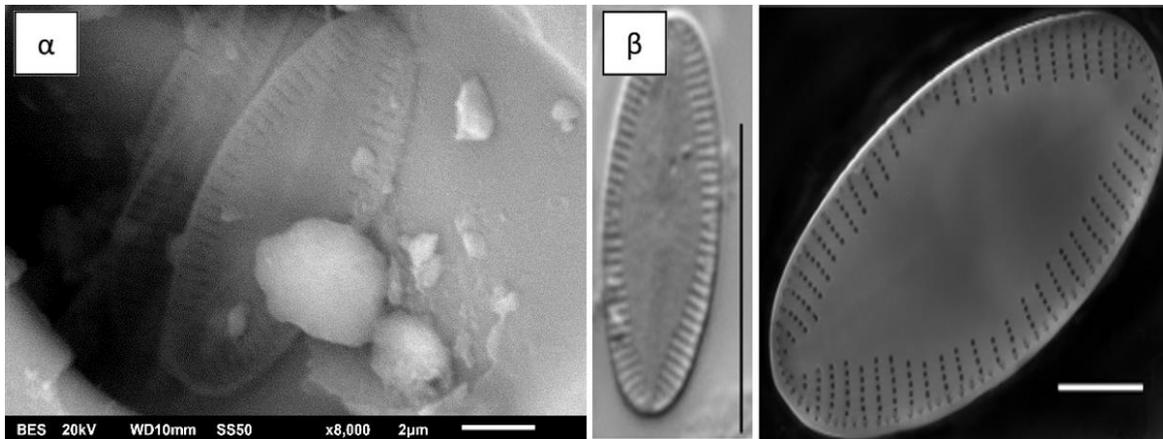


Figura 3.14 Muestra de sedimento del lago La Luna α) P1Lx8000 comparada con β) *Psammothidium acidoclinatum* (Potapova, 2010).

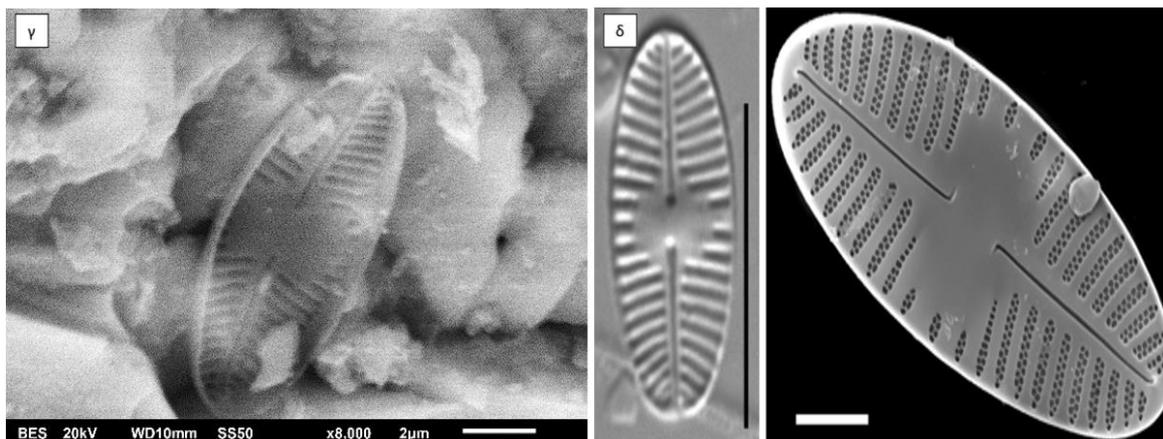


Figura 3.15 Muestra de sedimento del lago La Luna γ) P2Lx8000 comparada con δ) *Platessa hustedtii* (Potapova, 2011).

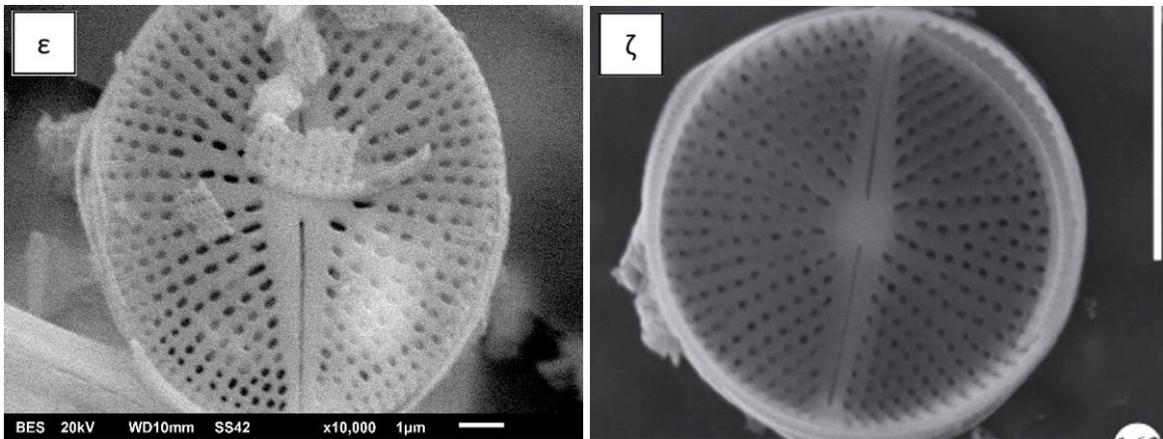


Figura 3.16 Muestra de sedimento del lago El Sol ε) P3Sx10000 comparada con ζ) *Cavinula pseudoscutiformis* (Cvetkoska et al., 2014).



Figura 3.17 Muestra de sedimento del lago El Sol η) P2Sx5000 comparado con θ) *Planothidium lanceolatum* (Stancheva et al., 2020).

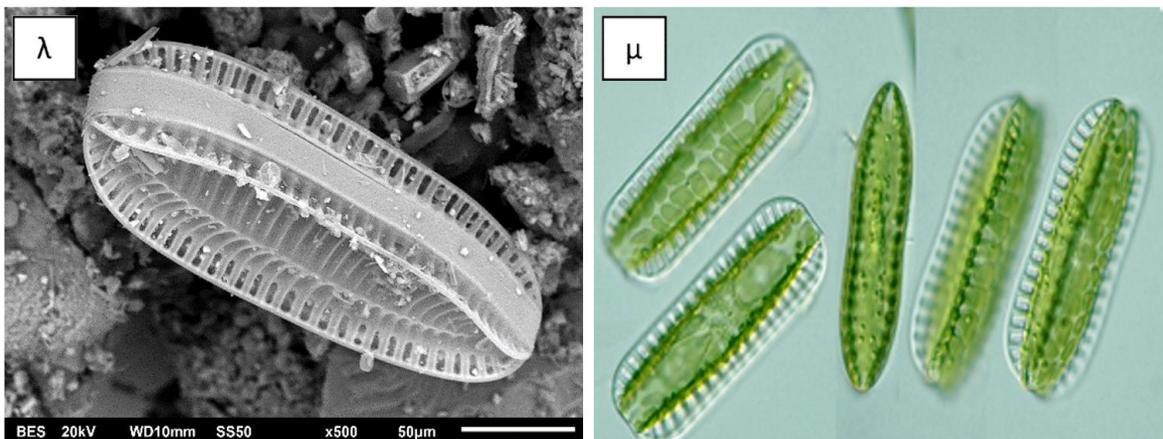


Figura 3.18 Muestra de sedimento del lago El Sol λ) P3Sx500 comparado con μ) *Surirella linearis* (Tsukii, 2005).

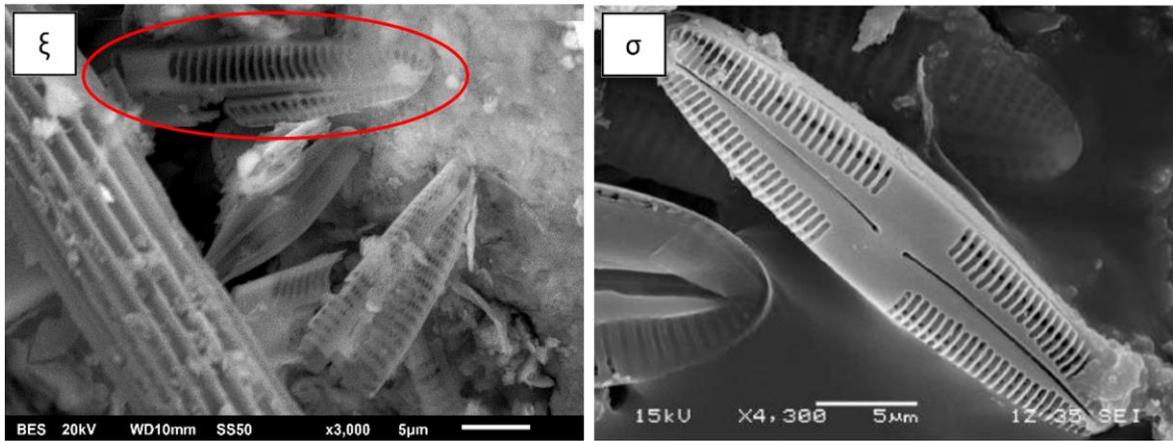


Figura 3.19 Muestra de sedimento del lago El Sol ξ) P3Sx3000 comparado con σ) *Caloneis Bacillum* (Soler, 2015).

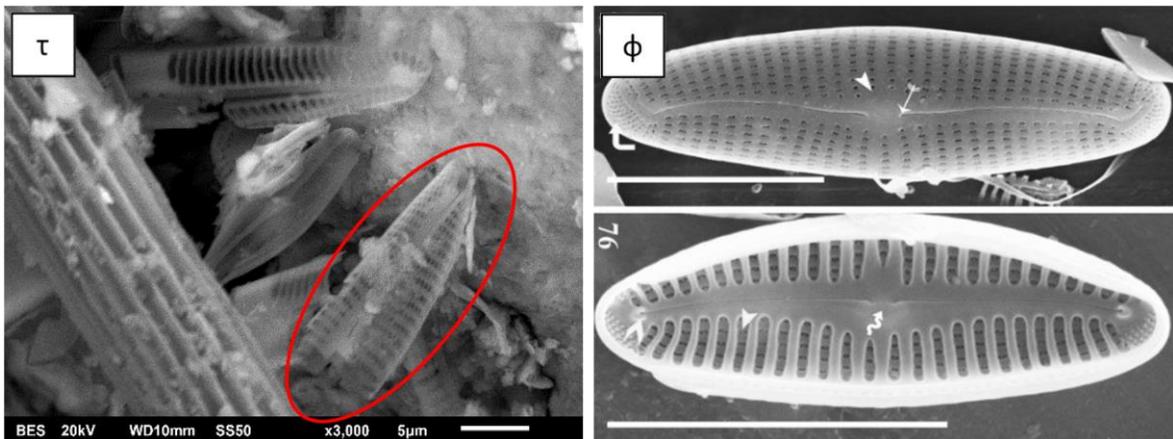


Figura 3.20 Muestra de sedimento del lago El Sol τ) P3Sx3000 comparado con ϕ) *Cymbella cognata* (Rodionova 2013).

De igual forma se logró observar polen de pino (Bykowska & Klimko, 2015) en la figura 3.21.

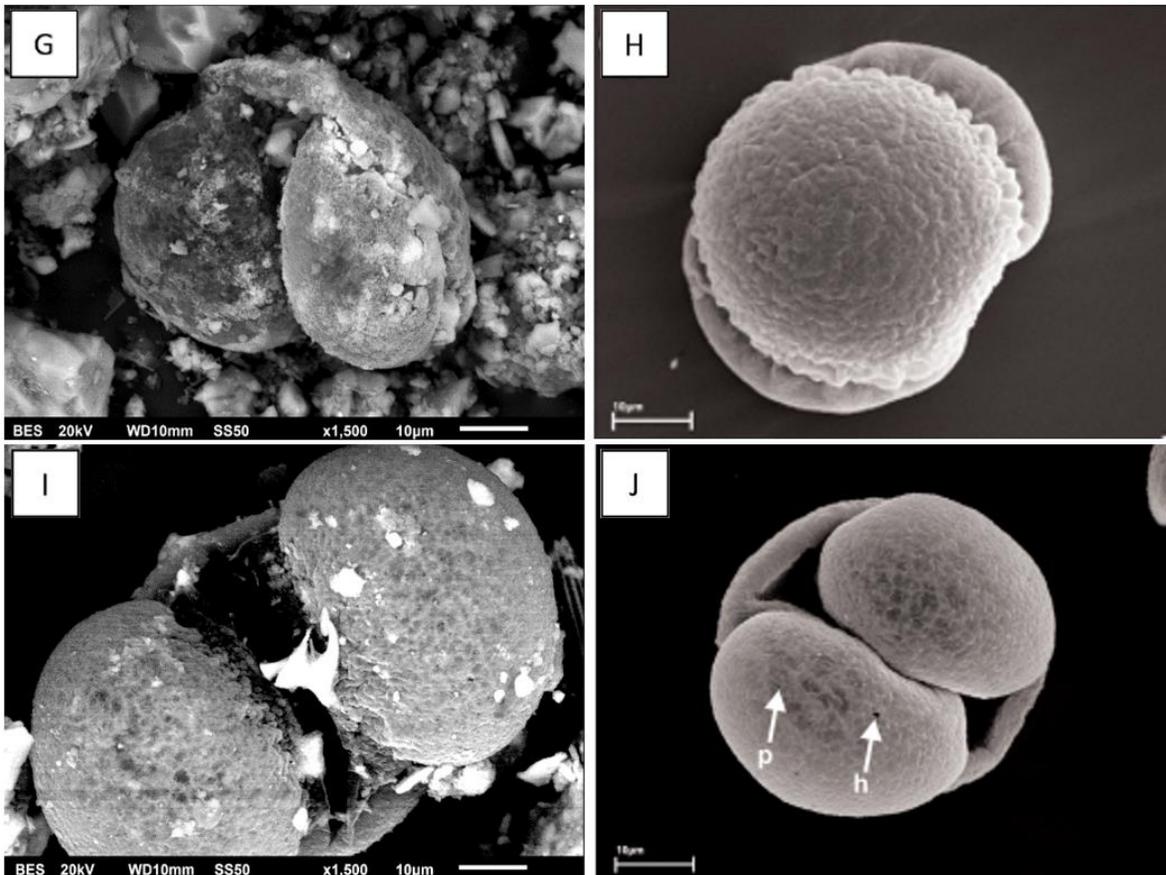


Figura 3.21 Micrografías de polen de pinus en muestras de sedimento del lago La Luna: G) P1Lx1500 comparada con H) Micrografía de polen de pinus, vista 7a (Bykowska & Klimko, 2015); I) P2Lx1500 comparada con J) Micrografía de polen de pinus, vista 10 (Bykowska & Klimko, 2015)

Como se puede observar en las imágenes anteriores en las lagunas existe una amplia variedad de diatomeas, e inclusive material como lo que es el polen de pino, el cual llega a los lagos por acción del viento desde la falda del volcán y sus alrededores hasta su cima. La presencia de estas partículas ya ha sido reportada con anterioridad por Alcocer et al. (2004).

En la tabla 3.6 se presentan los resultados del contenido elemental por muestreo de las muestras de ambos lagos.

Tabla 3.6 Análisis elemental por EDS de las muestras del lago La Luna

Elemento	Puntos de muestreo y concentración cada elemento (%W)						
	P1S	P2S	P3S	P4S	P1L	P2L	P3L
C	26.78 ± 5.47	24.16 ± 4.74	25.66 ± 2.49	25.11 ± 7.22	31.37 ± 0.66	25.00 ± 4.54	35.99 ± 3.50
O	48.81 ± 3.10	49.6 ± 2.04	48.89 ± 0.37	50.04 ± 2.26	48.34 ± 2.25	50.54 ± 1.83	45.84 ± 2.25
Na	1.07 ± 0.36	1.19 ± 0.29	1.29 ± 0.25	1.32 ± 0.31	1.27 ± 0.04	1.33 ± 0.44	0.95 ± 0.05
Mg	0.48 ± 0.03	0.77 ± 0.12	0.51 ± 0.19	0.43 ± 0.11	N/D	0.72 ± 0.22	0.55 ± 0.08
Al	4.99 ± 0.24	4.96 ± 0.60	4.15 ± 0.70	4.18 ± 1.16	4.61 ± 0.49	5.24 ± 0.65	4.14 ± 0.08
Si	13.25 ± 1.52	14.14 ± 2.33	14.29 ± 0.85	14.96 ± 3.05	11.82 ± 1.00	13.33 ± 1.48	9.75 ± 1.54
Ca	1.21 ± 0.24	1.06 ± 0.05	0.89 ± 0.03	0.97 ± 0.20	0.75 ± 0.11	1.07 ± 0.30	0.76 ± 0.12
Ti	N/D	N/D	0.32 ± 0.18	0.23 ± 0.01	N/D	N/D	N/D
Fe	2.04 ± 0.41	2.54 ± 0.52	1.92 ± 0.35	1.64 ± 0.63	2.19 ± 0.56	2.31 ± 0.48	1.85 ± 0.34
Ni	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D
Cd	N/D	N/D	0.83 ± 0.48	N/D	N/D	N/D	N/D
Pb	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D

N/D = No Detectado

El oxígeno es el elemento que domina la composición de las muestras, seguido del carbono, silicio y aluminio, el resto de elementos evaluados están por debajo del 4% en peso, siguiendo la secuencia Fe>Na>Ca>Mg>Ti. En casi todas las muestras no se detectaron los metales pesados en los cuales se enfoca el presente trabajo, lo cual puede deberse a la cantidad de muestra y de esos metales, así como el tamaño de partículas utilizados para este análisis. Los resultados de ambos lagos reafirman lo mencionado por Cantagrel (1981) y por García-Palomo (2002), ya que se detectó Si, Ti, Al, Mg, Na, Ca, Fe y O. Los autores anteriores afirman que los metales mencionados se encuentran en el Nevado de Toluca en forma de óxidos, para poder decir lo mismo con los resultados de este estudio es necesario realizar un estudio de difracción de rayos X el cual queda fuera de los objetivos de este estudio.

3.7 Espectrometría de Absorción atómica a la Flama (EAAF)

Debido a las limitaciones presentes para esta prueba solo se realizó una medición en cada muestra por cada época de muestreo. Se determinó cadmio, níquel y plomo, en la figura 3.22 se observa las muestras al ser filtradas después de la extracción con DTPA.



Figura 3.22 Filtrado de la muestra después de la extracción con DTPA

En la figura 3.23 se muestra el espectrómetro de absorción atómica utilizado para esta prueba.



Figura 3.23 Espectrómetro de absorción atómica Perkin Elmer “AAAnalyst 200”

Los resultados se muestran a continuación (tabla 3.7).

Tabla 3.7 Concentraciones de Cd, Pb y Ni en las muestras

Muestra	Época de lluvias 2021 (mg/kg)			Época de estiaje 2021(mg/kg)			Época de lluvias 2022 (mg/kg)		
	Cd	Pb	Ni	Cd	Pb	Ni	Cd	Pb	Ni
P1L	N/D	1.32	0.07	N/D	1.85	0.01	0.02	1.20	N/D
P2L	N/D	0.02	0.05	N/D	2.09	0.03	0.02	0.84	N/D
P3L	N/D	0.07	0.07	N/D	0.97	N/D	0.03	1.26	N/D
Promedio	N/A	0.47	0.06	N/A	1.64	0.02	0.02	1.10	N/A
P1S	0.01	1.51	0.02	N/D	1.14	0.04	0.02	0.97	N/D
P2S	0.02	0.21	N/D	0.01	1.61	0.04	0.02	0.50	N/D
P3S	0.02	0.80	0.05	N/D	29.87	0.03	0.01	0.54	N/D
P4S	-	-	-	N/D	0.98	0.09	0.03	0.61	N/D
Promedio	0.02	0.84	0.03	0.01	8.40	0.05	0.02	0.66	N/A
R²	0.999	0.996	0.994	0.999	0.996	0.994	0.999	0.996	0.994
Longitud de onda (nm)	228.8	283.3	232.0	228.8	283.3	232.0	228.8	283.3	232.0

N/D No Detectado; N/A No Aplica; Para los promedios solo se consideran las muestras con valores

En el primer muestreo el contenido de plomo en P1L contuvo la mayor concentración de los puntos de La Luna, siendo hasta 66 veces la concentración hallada en P2L, El Sol presentó un valor mayor al de La Luna en ese muestreo. En el mismo muestreo no halló cadmio en las muestras de La Luna, caso contrario a las muestras de El Sol, donde las concentraciones fueron muy bajas. Concerniente a níquel se halló una mayor presencia en La Luna, pero con valores semejantes entre ambos lagos. En el segundo muestreo el caso de cadmio se repitió en las muestras de La Luna, en las de El Sol no se determinó su presencia en la mayoría de puntos, el valor de plomo elevó sus valores en casi todos los puntos, la más notable fue en P3S lo cual pudo ser indicio de contaminación aérea, algo que ya se había detectado con anterioridad, ya que en 2005 Vilaclara y colaboradores

detectaron la presencia de partículas de carbón esféricas, las cuales son productos de la combustión de hidrocarburos fósiles. El níquel no presentó fluctuaciones considerables. En el último muestreo no se detectó la presencia de níquel para los dos lagos. Cabe destacar que fue el primer muestreo donde se detectó cadmio en La Luna, con valores muy bajos. El plomo presentó valores semejantes a los detectados con anterioridad. Los valores obtenidos para los tres elementos no necesariamente se deben a contaminación, ya que probablemente pueden tener su origen en la misma zona, por ejemplo, el níquel se suele relacionar con la actividad volcánica. Comparando los resultados del análisis por EDS y EAAF existió una discrepancia entre los valores presentados, que a su vez presagiaron las bajas concentraciones detectadas por EAAF, también pudo influenciar el tamaño de partícula y la cantidad de muestra utilizada en cada prueba.

Referente a las variaciones de las concentraciones de los metales pesados entre épocas, en La Luna se presentó un aumento en el cadmio al finalizar este proyecto. El níquel presentó concentraciones mayores en la época de lluvias de 2021 en La Luna, mientras en El Sol fue en la época de estiaje. El plomo tuvo mayores concentraciones en la época de estiaje, lo cual puede deberse al poco arrastre que sufren de las partículas debido a que la mayor fuente de ello son las corrientes de viento que rozan la superficie de los cuerpos de agua. También existe la posibilidad de que estos metales sean arrastrados a zonas más céntricas de los cuerpos de agua en época de lluvias por las corrientes generadas o de igual forma se hallen en esa zona si se encuentran ligados a la MO.

Los valores de este trabajo son menores a los hallados en sedimentos de la laguna de Términos, Tabasco (México) reportados por De la Cruz-Landero y sus colaboradores (2013), ellos reportaron para Cd 0.39 a 0.44 mg/kg (\approx 20 veces más el valor más alto de este trabajo) y para el caso del Pb la concentración máxima de este trabajo estuvo por encima de la que ellos registraron (16.05 mg/kg).

Al cotejar los resultados con algunos reportados en áreas relativamente cercanas quedan por debajo de los valores como ≤ 328 (Pb), ≤ 3.49 (Cd) reportados por Martínez-Alva et al. (2015) en suelos agrícolas del NT; 9.39 mg/kg (Cu), 47.89 mg/kg (Pb) en sedimentos de la presa J.A. Alzate (Barceló-Quintal et al., 2018) y 68.15 (Pb) para sedimentos de la laguna de Chignahuapan (Solís-Correa et al., 2017).

Las concentraciones de los tres elementos están muy debajo de los límites dictados por la NOM-147-SEMARNAT-SSA1-2004 (37 mg/kg-suelo para cadmio, 400 mg/kg-suelo para plomo y 1600 mg/kg-suelo para níquel). Éstas de igual forma refuerzan lo obtenido por medio del análisis EDS, en donde no se detectaron concentraciones de metales pesados (a excepción de un punto de muestreo) ya sea debido a que están por debajo del límite de detección o porque se hallaban en concentraciones nulas.

Los dos párrafos anteriores demuestran que esta área aún no tiene un gran impacto antropogénico con respecto a los metales estudiados, pero no por ello se deben despreciar los resultados, ya que, debido a las corrientes de viento, varios contaminantes terminan siendo arrastrados a estos cuerpos de agua, sirviendo de indicativo de la contaminación general de toda la zona circundante al NT.

Conclusiones

A pesar de que ambos lagos comparten su origen, clima y régimen hídrico los puntos de muestreo exhibieron composiciones y particularidades diversas, lo cual se pudo observar en sus matices que presentaron, en el lago El Sol predominaron tonos claros, mientras en La Luna las muestras tuvieron una coloración más oscura.

En La Luna se observó una distribución granulométrica de partículas homogénea, mientras en El Sol se notó una diferencia entre cada punto, la cual se marcó más al comparar los puntos P1S y P4S, a pesar de esto los puntos de muestreo se consideraron con una textura “arenosa”.

Los resultados de densidad aparente se encontraron dentro de 1.16 y 1.43 g/mL, en los tres puntos de La Luna se tuvo un comportamiento semejante con una porosidad total que fue desde 40 % hasta 54 %. En El Sol la densidad aparente se encontró en el rango de 1.16 a 1.40 g/mL, lo que se traduce en una porosidad total de hasta el 62%. Los puntos que compartieron contenidos semejantes de arenas tuvieron valores de densidad aparente parecidos, como lo fue en el P1L con el P2L y el P2S con el P3S.

Las muestras de La Luna presentaron valores de densidad real similares (lo cual va de la mano a la densidad aparente) dentro del rango de 2.40 – 2.61 g/mL. La mayoría de los puntos de El Sol presentaron un valor semejante, mientras que los espacios de aire en las muestras del punto P3S provocan un valor menor en este parámetro. De forma general los valores se asemejaron al considerado como promedio para la mayoría de minerales (2.65 g/mL).

El contenido de materia orgánica hallada en los sedimentos de ambos lagos fue desde 0.086 % hasta 1.070 %, por lo tanto, de acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000 se clasifican con un contenido “muy bajo”, este hecho se relacionó con el bajo contenido de arcillas en las muestras. Los valores podrían variar significativamente si se repite el experimento añadiendo puntos más céntricos en los lagos, ya que estos puntos pueden servir como trampas de acumulación para este tipo de material.

En las micrografías se observaron las distintas formas y tamaños de los minerales presentes en el área, así como una diversidad de microalgas y para la correcta identificación de ellas se recomienda un análisis más riguroso, así como un estudio extra para verificar si estas han acumulado metales pesados en sus estructuras. El microanálisis elemental por EDS reafirma los elementos que marca la literatura como presentes en el área, además de indicar un bajo grado de contaminación ya que solo se halló la presencia de cadmio en un punto.

Por medio de EAAF se halló la concentración más alta de plomo en el punto P3S (29.87 mg-Pb/kg), existe la posibilidad que esta concentración se relacione con contaminación atmosférica a pesar de que en este estudio no se hallaron partículas esféricas de carbón en las micrografías, pero si se cuenta con antecedentes que den soporte a esta idea. El cadmio y níquel no rebasaron los 0.09 mg/kg, las concentraciones de los tres elementos evaluados no representan un riesgo a la calidad de los sedimentos ya que están por debajo de los límites marcados por la normatividad mexicana (NOM-147-SEMARNAT-SSA1-2004). También al predominar las gravas y las arenas en los puntos de muestreo se sugiere que debido a la permeabilidad, existe la posibilidad de que los metales evaluados terminen siendo infiltrados a profundidades mayores de las manejadas en este estudio, o bien estén ligados por medio de intercambio catiónico a la materia orgánica que puede estar presente en cantidades mayores en zonas más centrales y profundas de los

cuerpos de agua, por lo tanto, se recomienda la realización de un estudio semejante considerando puntos de muestreo de zonas más internas en ambos cuerpos de agua.

Considerando lo anterior no se puede negar la presencia de Pb, Cd y Ni en los dos únicos lagos de alta montaña de México, aun así, dadas las concentraciones existentes hasta la fecha de culminación de este estudio, estos metales no representan un riesgo, pero no por ello se debe dejar de lado un monitoreo continuo de contaminantes en esta área.

Referencias

Alcocer, J., Arce, J.L., Vázquez, L., Junco, R., García, A., Novelo, A., Murillo, O., Sugiura, Y., Rivas, F., Martínez, R., Broda, J & Maruri, M.E. (2009). *Limnología*. En Las aguas Celestiales (pp. 10 - 15). México: INAH.

Alvarado, G., Brenes-André, J., Barrantes, M., Vega, E., de Moor, J.M., Avard, G., Dellino, P., Mele, D., De Vitre, C., Di Piazza, A., Rizzo, L. & Carapezza, M. (2016). La actividad explosiva del volcán Turrialba (Costa Rica) en el período 2010 - 2016 . *Revista Geológica de América Central*, 55, pp. 7 – 60.

Ambientum. (2022). *Determinación de la materia orgánica*. 14/07/2022, de Ambientum. Sitio web: https://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/aguas/determinacion_materia_organica.asp

Arias, J.C. & Ramírez J.J. (2009). Caracterización preliminar de los sedimentos de un embalse tropical: represa La Fe (El Retiro, Antioquia, Colombia). *Limnetica*, 28, pp. 65 -78.

Armienta, A. M., Vilaclara, G., De la Cruz-Reyna, S., Ramos, S., Ceniceros, N., Cruz, O., Arcega-Cabrera, F. (2008). Water chemistry of lakes related to active and inactive Mexican volcanoes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 178, pp. 249-258.

ATSDR Agencia para sustancias tóxicas y el registro de enfermedades. (2005). *Resumen de Salud Pública – Níquel*. 18/04/2022, de ATSDR. Sitio web: https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs15.pdf

Báez, A., Hidalgo, C.I., Matus, F.J., Prat, C. & Etchevers, J.D. (2011). *Materia orgánica edáfica y captura de carbono en sistemas Iberoamericanos*. Salamanca, España: SiFyQA. pp. 61 – 79.

Barceló-Quintal, I.D., Solís-Correa, H.E., García-Albortante, J., Avila-Pérez, P., García-Martínez, M. & Osornio-Berthet, L.J. (2018). Superficial sediment evaluation

of a dam in the state of Mexico, Mexico as deposit of Cd, Cu and Pb metals. *Revista Tendencias en Docencia e Investigación en Química*, 4, pp. 219 – 226.

Bello, A., Tawabini S., Khalil A., Boland C. & Saleh T. (2018). Phytoremediation of cadmium-, lead- and nickel-contaminated water by *Phragmites australis* in hydroponic systems. *Ecological Engineering*, 120, pp. 126-133.

Beltrán, E. (2015). Metales pesados (Cd, Cr y Hg): su impacto en el ambiente y posibles estrategias biotecnológicas para su remediación. *Investigación Innovación Ingeniería*, 2, pp. 82-110.

Beltrán, J., Huachi, L., León, E y Bonifaz, N. (2021). *Evaluación de la actividad microbiana en el suelo en respuesta a la aplicación de abono compost y su efecto en la producción en pastos*. 19/09/2021, de Infortamboandina. Sitio web: <https://infortamboandina.co/apc-aa-files/a944b6c7b69099b8dc1b99fe7caafa96/articulo-ii-deber-curso.pdf>

Broadbent, F. E. (1953). The soil organic fraction. *Advances in Agronomy*, 5, pp. 153-183.

Bykowska & Klimko. (2015). Pollen morphology of *Pinus Mugo Turra* × *Pinus Sylvestris* L. Hybrids and parental species in an experimental culture. *Acta Biologica Cracoviensia Series Botanica*, 57, pp. 149 - 160.

Caballero, M., Zawisza, E., Hernández, M., Lozano, S., Ruíz-Córdova, J., Waters, M., & Ortega, B. (2020). The Holocene history of a tropical high-altitude lake in central Mexico. *The Holocene*, 30, pp. 1 -13.

Cantagrel, J.M., Robin, C. & Vincent, P (1981). Les grandes étapes d'évolution d'un volcan andésitique composite: Exemple du Nevado de Toluca (México): *Bulletin Volcanologique*, 44, pp. 177- 188.

Cantoral E. (2012). *Surirella linearis*. 21/09/2021, de CONABIO. Sitio web: <http://bdi.conabio.gob.mx/fotoweb/archives/5004->

Microorganismos/Otros%20Archivos/Microorganismos/UNAMECU-57%20Surirella%20linearis.jpg.info

Carreño, C., Zarazúa, G., Fall, C., Ávila, P. & Tejeda, S. (2017). Evaluación de la toxicidad de los sedimentos del Curso Alto del Río Lerma, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 34, pp. 117-126.

CCME Canadian Council of Ministers of the Environment. (1999a). *Canadian Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life – Lead*. 20/09/2021, de CCME. Sitio web: <https://ccme.ca/en/res/lead-canadian-sediment-quality-guidelines-for-the-protection-of-aquatic-life-en.pdf>

CCME Canadian Council of Ministers of the Environment. (1999b). *Canadian Sediment Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health – Nickel*. 20/09/2021, de CCME. Sitio web: <https://ccme.ca/en/res/nickel-canadian-soil-quality-guidelines-for-the-protection-of-environmental-and-human-health-en.pdf>

CCME Canadian Council of Ministers of the Environment. (1999c). *Canadian Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life – Cadmium*. 20/09/2021, de CCME. Sitio web: <https://ccme.ca/en/res/cadmium-canadian-sediment-quality-guidelines-for-the-protection-of-aquatic-life-en.pdf>

CEPANAF. (2021). *Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca*. Fecha de consulta 01/10/2021, de Gobierno del Estado de México. Sitio web: https://cepanaf.edomex.gob.mx/parque_nevado_toluca

Ciancaglini N. (2021). R- 001- Guía para la determinación de textura de suelos por método organoléptico. *INTA*, 1, pp. 1 -10.

Coyote A. (2021). *Captura de carbono y su relación con las prácticas agrícolas en cultivos de maíz cacahuazintle (zeamays, l) en la localidad de zaragoza municipio de Calimaya, Estado de México*. Tesis para obtener el título de: Licenciada en ciencias ambientales. Universidad Autónoma del Estado de México, Estado de México (México).

-
- Cuna, E., Alcocer, J., Gaytán, M. & Caballero, M. (2022). Phytoplankton Biodiversity in Two Tropical, High Mountain Lakes in Central Mexico. *Diversity*, 14, pp. 1 – 17.
- Cuna, E., Caballero, M., Edyta, Z., & Ruiz, C. (2015). Historia ambiental de un lago alpino en el centro de México (1230-2010). *Revista especializada en ciencias químico-biológicas*, 18(2), 97-106.
- Cvetkoska, A., Hamilton P., Levkov, Z & Potapova. (2014). The biogeographic distribution of Cavinula (Bacillariophyceae) in North America with the descriptions of two new species. *Phytotaxa*, 184, pp. 181 - 207.
- De la Cruz-Landero (2013). Acumulación de metales pesados en sedimentos del ecosistema manglar en laguna de Términos, Campeche, México. *Foresta Veracruzana*, 15, pp. 25- 30.
- De la Mora, C., García, S.B., González, I.J. Flores, H.E., Martínez, E., Chávez, A.A. (2018). Caracterización química de sedimentos en un ecosistema lacustre. *Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo*, XLIII, pp. 244-249.
- EPA Environmental Protection Agency (1996). *Method 3050b: Acid digestion of sediments, sludges, and soils*. 19/09/2021, de EPA. Sitio web: www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/epa-3050b.pdf
- EPA Environmental Protection Agency (2005). *Contaminated Sediment Remediation Guidance for Hazardous Waste Sites*. 19/09/2021, de EPA. Sitio web: <http://semspub.epa.gov/src/document/HQ/174471>
- Escobar, F. (2019). *Determinación de parámetros físico-químicos y niveles de metales pesados en agua y sedimentos en la zona de crianza de truchas (oncorhynchus mykiss), bahía de puno del lago Titicaca*. Tesis para obtener el grado de: Doctor en Ciencia. Universidad Nacional del Antiplano (Puno).
- Espósito, M., Blanco, M., Paoloni J., & Amiotti, N. (2017). Variabilidad espacio-temporal del par As-Cd en el recurso hídrico y zonas de riesgo en el tramo

sudoccidental de la llanura Pampeana, Argentina. *Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas*, 42, pp. 24-37.

FAO. (2022). *Propiedades Químicas*. 21/02/2022, de FAO Sitio web: <https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/clasificacion-de-suelos/sistemas-numericos/propiedades-quimicas/es/>

FIDEPAR. (2021). *Desarrollos Industriales*. 01/12/2021, de Gobierno del Estado de México Sitio web: https://fidepar.edomex.gob.mx/desarrollos_industriales

Flores, C., Del Ángel, E., Frías, D. & Gómez, A.L. (2018). Evaluación de parámetros fisicoquímicos y metales pesados en agua y sedimento superficial de la Laguna de las Ilusiones, Tabasco, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 9, pp. 39-57.

Franco, E.A. & MasPOCH, M.L. (2009). Estructura general de las arcillas utilizadas en la preparación de nanocompuestos poliméricos. *Ingenierías*, 44, pp. 35 – 45.

Franco, S., Osorio, M., Nava, G. & Regil, H.H. (2009). *Evaluación Multicriterio de los Recursos Turísticos*. Estudios y Perspectivas en Turismo, 18, pp. 208-226.

Galindo, M.S., Segovia, J.A., Rivera, I. (1984). Contenido de materia orgánica en sedimentos superficiales de la bahía de Todos los Santos, Baja California. *Ciencias Marinas*, 10. pp. 93-102.

Gallegos, W., Vega, M. & Noriega, P. (2012). Espectroscopía de absorción atómica con llama y su aplicación para la determinación de plomo y control de productos cosméticos. *La Granja*, 15, pp. 18-25.

Galunin, E. & Ferret, F. & Zapelini I. & Vieira I. & Teixeira C. & Abrão T. & Santos M. (2014). Cadmium mobility in sediments and soils from a coal mining area on Tibagi River watershed: Environmental risk assessment. *Journal of Hazardous Materials*, 265, pp. 280-285.

García-Palomo, A., Macías, J.L., Arce, J.L. Capra, L., Garduño, V.H. & Espíndola, J.M. (2002). *Geology of Nevado de Toluca Volcano and surrounding areas, central Mexico*. Geological Society of America, MCH089, pp. 1 - 26.

García-Solorio, L., Muro, C., De La Rosa, I., Amador-Muñoz, O. & Ponce-Vélez, G. (2022). Organochlorine Pesticides and Polychlorinated Biphenyls in High Mountain Lakes, Mexico. *Environ Sci Pollut Res Int*, 29, pp. 49291-49308.

Geoxnet. (2016). *Escala Granulométrica de Udden-Wentworth*. 22/11/2021, de Geoxnet. Sitio web: <https://post.geoxnet.com/escala-granulometrica-de-udden-wentworth/>

Gómez, A., Orozco M.T., & Ferrari L. (2005). *Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 57, pp. 227-283.

Gómez, L. E., Raigemborn, M.S. & Poiré, D. (2011). Petrología y evolución diagenética de las facies silicoclásticas del grupo sierras bayas, sistema de Tandilia, Argentina. *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis*, 18, pp. 3 - 41.

Hamid, Y., Tang, L., Sohail, M.I., Cao, X., Hussain, B., Aziz, M.Z., Usman, M., He, Z. & Yang, X. (2019). An explanation of soil amendments to reduce cadmium phytoavailability and transfer to food chain. *Science of the Total Environment*, 660, pp. 80-96.

Hernández, F. (2014). *Determinación de cadmio en suelos agrícolas dedicados a la producción de Alfalfa irrigados con aguas residuales*. Tesis para obtener el título de: Licenciado en Geografía. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Torreón (México).

Hernández-Ávila, J., Salinas-Rodríguez, E., Cerecedo-Sáenz, E., Reyes-Valderrama, M.I., Arenas-Flores, A., Román-Gutiérrez, A.D., Rodríguez-Lugo, V., (2017). Diatoms and their capability for heavy metal removal by cationic exchange. *Metals*, 7, pp. 1 – 10.

Hildebrand, M., 2008. Diatoms, biomineralization processes, and genomics. *Chem. Rev*

Hoyos, L.M., Espiel, E. & Quintero, Y. (2015). Caracterización fisicoquímica de cuarzo en el municipio de La Playa de Belén, departamento de Norte de Santander. *Tecnura*, 19, pp. 41 – 51.

INAH. (2012). *Hallan ofrendas en el Nevado de Toluca*. 22/09/2021, de Gobierno de México. Sitio web: <https://inah.gob.mx/boletines/1789-hallan-ofrendas-en-el-nevado-de-toluca>

INEGI. (2001). Agricultura. *Síntesis de información geográfica del estado de México*, 1, pp. 106 - 111.

Intagri. (2022). *La Capacidad de Intercambio Catiónico del Suelo*. 27/03/2022, de Intagri. Sitio web: <https://www.intagri.com/articulos/suelos/la-capacidad-de-intercambio-cationico-del-suelo>

Izquierdo-Bautista, J. & Arévalo-Hernández, J.J. (2021). Determinación de la materia orgánica del suelo (MOS) por el método químico y por calcinación. *Revista Ingeniería y Región*, 26, pp. 20 – 28.

Kas, K., Das, S., & Dhundasi, S. (2008). Nickel, its adverse health effects and oxidative stress. *Indian Journal of Medical Research*, 128, pp. 412 – 425.

Kiran-Marella, T., Saxena, A. & Tiwari, A. (2020). Diatom mediated heavy metal remediation: A review. *Bioresource Technology*, 305, pp. 1 – 11.

Kostka A. & Lésniak A. (2019). Spatial and geochemical aspects of heavy metal distribution in lacustrine sediments, using the example of Lake Wigry (Poland). *Chemosphere*, 240, pp. 2 - 12.

Krauskopf, K.B. 1967. *Introduction to geochemistry. Intern. Stud. Ed.* (p. 721). New York: McGraw-Hill.

Löffler, H. 1964. The limnology of tropical high-mountains lakes. *Verhandlungen Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie*, 15, pp. 176-193.

Macías, J. L. (2005). Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57, pp. 379-424.

Madrigal, D. & González, M.A. (1996). Geomorfología glacial y periglacial del Nevado de Toluca. *Ciencias de la tierra de la atmósfera*, 3, pp. 95 - 101.

Margalef, R. (1949). *La vida en los lagos de alta montaña de los pirineos*. España: CSIC - Instituto Pirenaico de Ecología.

Martínez, E., Fuentes, J.P. & Acevedo E. (2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 8, pp. 68 - 96.

Martínez-Alva, Gutiérrez-Ruiz, M.E., Martínez-Campos, A.R, Villalobos-Pietrini, R. & Arteaga-Reyes.T.T. (2015). Concentración total y geodisponible de elementos potencialmente tóxicos en suelos volcánicos con uso agrícola del nevado de Toluca, México. *Contaminación Ambiental*, 31, 113-125.

Méndez, B.R. (2018). *Biodisponibilidad de metales pesados en sedimentos del humedal alto andino Collotacocha – Canray –Recuay- Ancash y sus efectos en la actividad ganadera, período 2017*. Tesis para obtener el título de: Ingeniero Ambiental. Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Huaraz, Ancash (Perú).

Mendoza, J. (2013). *Influencia de la granulometría en la licuación de arenas*. Tesis para obtener el grado de: Licenciatura en Ingeniería Civil. Universidad de Costa Rica, San Pedro (Costa Rica).

Moiseenko, T.I., Dauvalter, V.A. & Kagan L.Y. (1995). Mountain Lakes as Indicators of Air Pollution. *Water Resources*, 24, pp 556 – 564.

Montero I.A. (2021). *Nevado de Toluca*. Fecha de consulta 10/10/2021, de Montero. Sitio web: http://www.montero.org.mx/montanas/nevado_de_toluca

Moreau C. (2013). *Estudio de los minerales pesados presentes en la fracción arena de los sedimentos de la plataforma continental del golfo de Venezuela*. Tesis para

obtener el grado: Licenciado en Química. Universidad Central, Caracas (Venezuela).

Moreira, T., & Julián, R. (2017). *Propiedades de una bentonita industrial nacional y su caracterización estructural basada en absorción y difracción de rayos X*. Tesis para obtener el grado. Universidad Nacional De La Plata, Buenos Aires (Argentina).

Muñoz-Olivas, R., Abderrahim-Bouaid, M.L., Fernández-Hernando, P., Tadeo, J.L. Cámara, C. (2007). New perspectives for the application of diatomaceous earth to the remediation of polluted waters and soils. *Revista CENIC. Ciencias Químicas*, 38, pp. 283 – 287.

Net & Limarino (2000) Caracterización y origen de la porosidad en areniscas de la sección inferior del Grupo Paganzo (Carbonífero superior), Cuenca Paganzo, Argentina. *Asociación Argentina de Sedimentología*, 1-2, pp. 49 – 72.

Norma Mexicana NMX-AA-132-SCFI-2016. Muestreo de suelos para la identificación y la cuantificación de metales y metaloides, y manejo de la muestra (cancela a la NMX-AA-132- SCFI-2006).

Norma Oficial Mexicana NOM-021-RENACT-2000. Establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis.

Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. Establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio.

Olivares-Arias, V., Valverde-Som, L., Quiros-Rodríguez, V., García-Romero, R., Muñoz, N., Navarro-Alarcón, M. & Cabrera-Vique, C. (2015). Níquel en alimentos y factores influyentes en sus niveles, ingesta, biodisponibilidad y toxicidad: una revisión. *CyTA - Journal of Food*, 13, pp. 87 – 101.

Oseguera, L.A. & Alcocer, J. & Escobar E. (2016). Macroinvertebrados bentónicos de dos lagos tropicales de alta montaña en el volcán Nevado de Toluca, en la región central de México. *Hidrobiológica*, 26, pp. 419 - 432.

Payne, A. I. (1986). *The ecology of tropical lakes and rivers*. 1st ed. (p. 310). Inglaterra: Wiley.

Peláez- Peláez, J.M., Bustamante, J.J. & Gómez, E.D. (2016). Presencia de cadmio y plomo en suelos y su bioacumulación en tejidos vegetales en especies de *brachiaria* en el Magdalena Medio Colombiano. *Luna Azul*, 43, pp. 82 – 101.

Pérez, A. & Márquez, A.Z. (2017). *Sedimentología*. México: Universidad Autónoma Metropolitana.

Pineda, V. (2009). Granulometría y geoquímica de los sedimentos marinos en el área comprendida entre el seno Reloncaví y golfo Corcovado, Chile. *Ciencia y Tecnología del Mar*, 32, pp. 27-47.

Potapova, M. (2010). *Psammothidium microscopicum*. 27/09/2021, de Diatoms of North America. Sitio web: https://diatoms.org/species/psammothidium_microscopicum

Potapova, M. (2011). *Platessa hustedtii*. 27/09/2021, de Diatoms of North America. Sitio web: https://diatoms.org/species/platessa_hustedtii

Quispe, R., Belizario, G., Chui, H., Huaquisto, S., Calatayud, A., Yábar, P. (2019). Concentración de metales pesados: Cromo, Cadmio y Plomo en los sedimentos superficiales en el río Coata, Perú. *Revista Boliviana de Química*, 36, pp. 83-90.

Ramírez, R. (1997). *Propiedades físicas químicas y biológicas de los suelos*. Colombia: Produmedios.

Ramos, C., Ramos, I., Naranjo, C. & Molina F. (2015). Validación e implementación de una metodología para la determinación de Carbono Orgánico Total en suelos y sedimentos según ISO 14235:1998. *Revista Politécnica*, 21, pp. 9-17.

Ratto, S., Pierini, V., Venier, M. & Giuffré, L. (2010). Indicadores edáficos aplicados a sedimentos dragados contaminados del río Reconquista en disposición final, (Pcia. Buenos Aires). *Ciencia*, 5, pp. 35 – 45.

Restrepo, O.I., Tobón, J. & Restrepo, O.J. (2007). Efectos de algunas adiciones minerales colombianas en la fabricación del Clínter para cemento Pórtland I. *Dyna*, 152, pp. 263 – 276.

Rodionova & Pomazkina & Makarevich. (2013). *Encyonema mirabilis*, *Cymbella olgae* and *C. cognata*: new diatom species from Lake Baikal. *Diatom Research*, 28, pp. 487-502.

Rodríguez, J.A. & Alvarado, D.F. (2015). *Propuesta de un plan de manejo ambiental, en base a la presencia de metales pesados en el estero Huayla, Pto*, Tesis para obtener el título: Ingeniero Ambiental. Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca (Ecuador).

Rodríguez. A., Cuéllar. L., Maldonado, G. & Suardiaz M.E. (2016). Efectos nocivos del plomo para la salud del hombre. *Revista Cubana de Investigaciones Biomédicas*, 35, pp 251 - 271

Rueda, C.A. (2017). *Caracterización de las propiedades fisicoquímicas de sedimentos de la reserva biológica Limoncocha*. Tesis para obtener el grado de: Magister en Gestión Ambiental. Universidad Internacional SEK, Quito (Ecuador).

Santos, J., Almeida, S.F.P., Figueira, E. (2012). Cadmium chelation by frustulins: a novel metal tolerance mechanism in *Nitzschia palea* (Kützing) W. Smith. *Ecotoxicology*, 22, pp. 1 – 8.

Schlumberger. (2020). *Sedimento clástico*. 31/07/2021, de Oilfield Sitio web: https://glossary.oilfield.slb.com/es/terms/c/clastic_sediment

Servicio Geológico Mexicano. (2017). *Sedimentación*. 31/07/2021, de Gobierno de México. Sitio web: <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Rocas/Rocas-sedimentarias.html>

Soler, E. (2015) *Estudio de las diatomeas (Heterokontophyta, Bacillariophyceae) del bosque húmedo subtropical del Barranco de Azuaje, Gran Canaria, Islas Canarias*. Tesis para obtener el grado de: Doctor. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Las Palmas (España)

Solís-Correa, Barceló-Quintal I. D., H. E., Jiménez-Campos, J., García-Albortante J., García-Martínez, M. & Osornio-Berthet, L. (2017). Evaluación de metales potencialmente tóxicos para la biota en el sedimento de la laguna de Chignahuapan en el Estado de México. *Asociación Mexicana de Ingeniería Ciencia y Gestión Ambiental*, 3, pp. 1 – 7.

Stancheva, R., Kristan N., Kristan, W. & Sheath, R. (2020). Diatom genus *Planothidium* (Bacillariophyta) from streams and rivers in California, USA: diversity, distribution and autecology. *Phytotaxa*, 470, pp. 1- 30.

Taboada & Álvarez. (2008). *Fertilidad Física de los Suelos*. Buenos Aires (Argentina): Facultad Agronomía (UBA).

Thermo Fisher Scientific. (2021). *Espectroscopia de energía dispersiva*. 01/09/2021, de Thermo Fisher Scientific. Sitio web: <https://www.thermofisher.com/mx/es/home/materials-science/eds-technology.html>

Tsukii Y. (2005). *Surirella linearis*. 28/09/21, de Protist Information Server. Sitio web: http://protist.i.hosei.ac.jp/PDB/Images/Heterokontophyta/Raphidineae/Surirella/sp_1d.html

Tun, G., Álvarez, T., Zapata, G. & Sosa, E. (2017). Metales pesados en suelos y sedimentos de la zona cañera del sur de Quintana Roo, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 34, pp. 157-169.

Ud Din, I. (2010). *Hydro-chemical investigations of high altitude alpine lakes of Gilgit and Ghizar districts, northern areas of Pakistan*. (Master's thesis, University of Peshawar, Pakistán). Retrieved from <https://www.yumpu.com/en/document/view/43629907/hydro-chemical-investigations-of-high-altitude-alpine-lakes-of-gilgit->

Vásquez E.M. (2019). *Lixiviación de metales pesados de los sedimentos de la laguna de Limoncocha en agua ultrapura para determinar su movilidad con fines de conservación*, Tesis para obtener el grado: Máster en Gestión Ambiental. Universidad Internacional SEK, Quito (Ecuador).

Velazco, F. & Solís, J. (2009). *Crucero de caracterización bio-ecológica de la zona litoral del lago Titicaca en cuatro áreas seleccionadas. Cr 0907: Características granulométricas y geoquímicas de los sedimentos del lago Titicaca en áreas seleccionadas*. Instituto del mar del Perú.

Ventura, M. (2009). *Agua y cambio climático. Diagnósis de los impactos previstos en Cataluña*. España: Centro de Estudios Avanzados de Blanes.

Vilaclara, G., Cuna, E. & Zeeb, B. (2005). Subfossil chrysophyte morphotypes from two tropical, highmountain lakes in Nevado de Toluca volcano, Central México. *Nova Hedwigia Beih*, 128, pp. 309-335

Warrier, A. K., Pednekar, H., Mahesh, B.S., Mohan, R. & Gazi, S. (2016). Sediment grain size and surface textural observations of quartz grains in late quaternary lacustrine sediments from Schirmacher Oasis, East Antarctica: Paleoenvironmental significance. *Polar Science*, 10, pp. 89 – 100.

Yang, R., Yao, T., Xu, B., Jian, G. & Xin, X. (2007). Accumulation features of organochlorine pesticides and heavy metals in fish from high mountain lakes and Lhasa River in the Tibetan Plateau. *Environment International*, 33, pp. 151 - 156.

Anexos

Objetivos

Objetivo general.

Muestrear y determinar los principales parámetros fisicoquímicos como: granulometría, contenido de materia orgánica, y metales pesados en muestras de sedimentos de los Lagos de El Sol y La Luna del Nevado de Toluca.

Objetivos específicos

- Obtener muestras de sedimento de los lagos El Sol y La Luna por época climática y zona de muestreo.
- Realizar un análisis granulométrico de los sedimentos de los lagos El Sol y La Luna.
- Determinar las concentraciones de materia orgánica (COT) en los sedimentos de los lagos El Sol y La Luna por época climática y zona de muestreo.
- Analizar la acumulación de metales Cd, Pb, y As en sedimentos de los lagos El Sol y La Luna por época climática y zona de muestreo a través de espectroscopía de absorción atómica a la flama y EDS.

Espectrometría de absorción atómica a la flama

Los datos y las curvas de calibración utilizadas para esta prueba se muestran a continuación:

Tabla A1 Datos utilizados para generar la curva de calibración para Cd

Cd		
estándar	mg Cd/L	Absorbancia
1	0.5	0.097
2	2.0	0.409
3	3.0	0.647

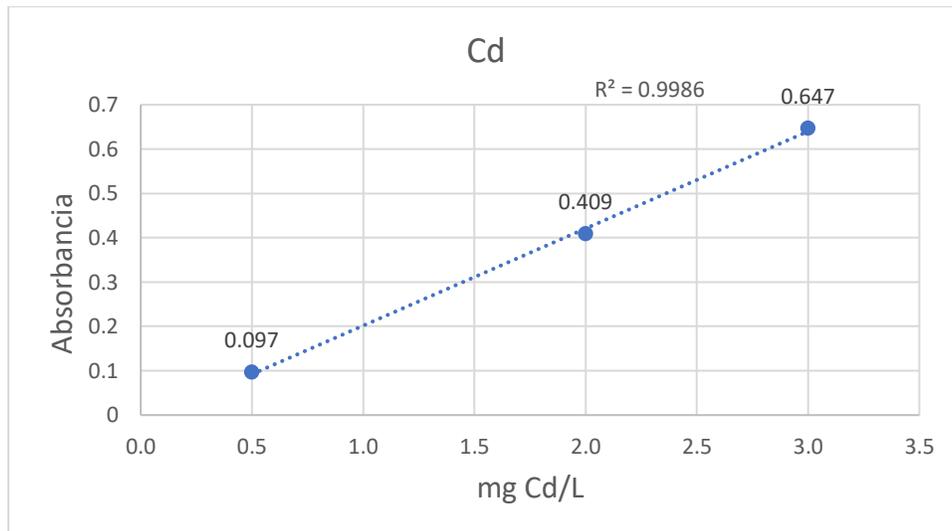


Figura A1 Curva de calibración para Cd

Tabla A2 Datos utilizados para generar la curva de calibración para Pb

Pb		
estándar	mg Pb/L	Absorbancia
1	0.5	0.010
2	1.0	0.018
3	1.7	0.028
4	3.0	0.046
5	5.0	0.073

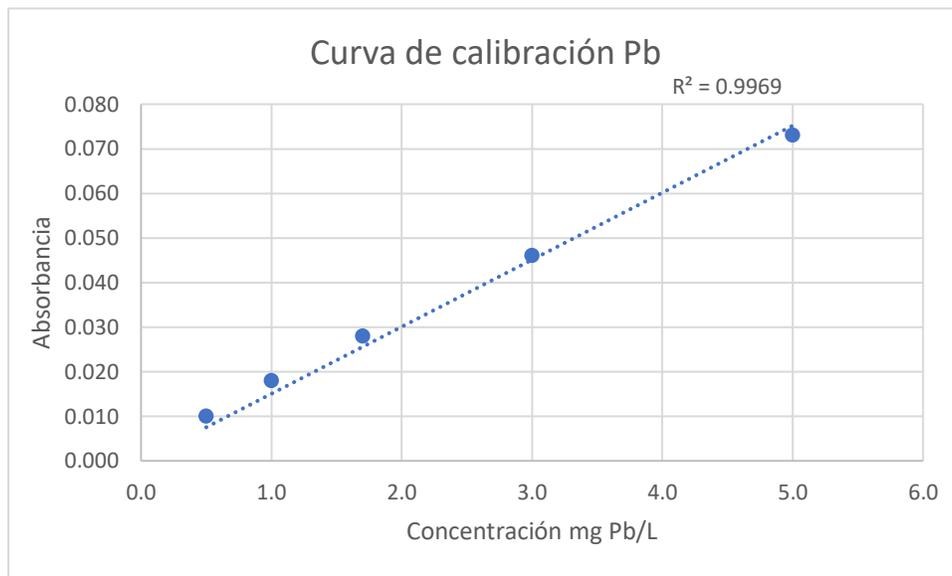


Figura A2 Curva de calibración para Pb

Tabla A3 Datos utilizados para generar la curva de calibración para Ni

Ni		
estándar	mg Ni/L	Absorbancia
1	0.5	0.037
2	1.3	0.082
3	2.0	0.114
4	3.0	0.170

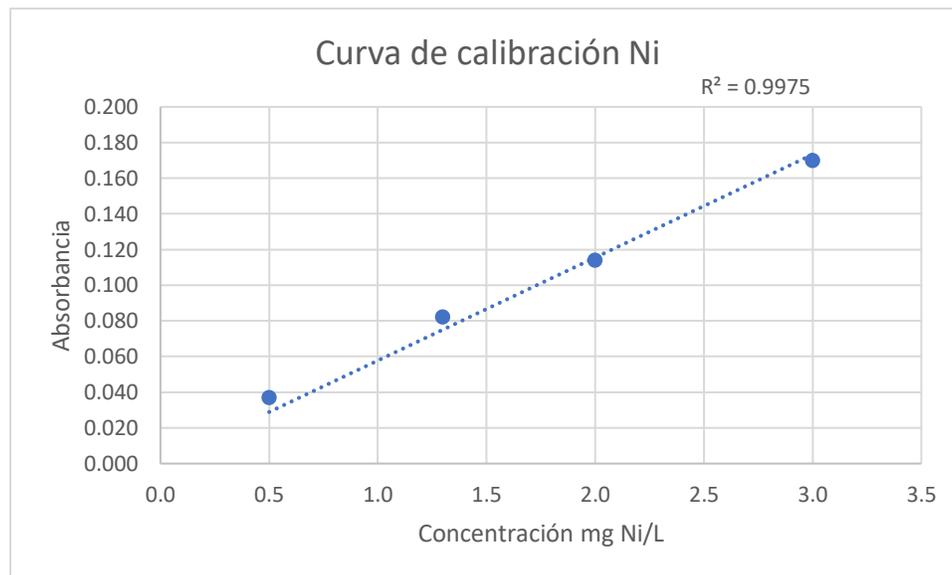


Figura A3 Curva de calibración para Ni

Materia orgánica

En la tabla A4 se presenta las concentraciones en unidades de g/kg de carbono orgánico total (COT) obtenidas en la marcha analítica, así como su transformación en contenido de la materia orgánica (MO) al ser aplicado el factor de Van Benmelen.

Tabla 15 A4 Concentraciones de MO y COT en g/kg

Sedimentos Lago La Luna y El Sol						
Muestra	Época de lluvias 2021		Época de estiaje 2021		Época de lluvias 2022	
	COT (g/kg)	MO (g/kg)	COT (g/kg)	MO (g/kg)	COT (g/kg)	MO (g/kg)
P1L	4.163 ± 0.064	7.177 ± 0.110	3.252 ± 0.047	5.607 ± 0.081	1.851 ± 0.045	3.191 ± 0.077
P2L	2.819 ± 0.179	4.860 ± 0.309	2.644 ± 0.157	4.559 ± 0.219	2.476 ± 0.047	4.268 ± 0.081
P3L	2.928 ± 0.031	5.048 ± 0.053	1.932 ± 0.028	3.330 ± 0.049	4.505 ± 0.066	7.766 ± 0.114
Promedio	3.304 ± 0.091	5.695 ± 0.157	2.610 ± 0.068	4.500 ± 0.116	2.943 ± 0.053	5.074 ± 0.091
P1S	3.963 ± 0.019	6.832 ± 0.033	3.692 ± 0.163	6.365 ± 0.280	6.092 ± 0.057	10.502 ± 0.098
P2S	6.144 ± 0.014	10.591 ± 0.024	2.664 ± 0.163	4.592 ± 0.280	1.953 ± 0.179	3.367 ± 0.309
P3S	6.205 ± 0.148	10.697 ± 0.256	2.557 ± 0.066	4.408 ± 0.114	0.496 ± 0.094	0.855 ± 0.163
P4S	-	-	3.937 ± 0.066	6.788 ± 0.114	1.029 ± 0.038	1.775 ± 0.056
Promedio	5.437 ± 0.060	9.373 ± 0.078	3.212 ± 0.114	5.537 ± 0.197	2.393 ± 0.092	4.125 ± 0.158