

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y FARMACIA

CUANTIFICACIÓN DE METALES (COBRE, CADMIO, PLOMO, ZINC, CROMO Y
NÍQUEL), EN NÚCLEOS DE SEDIMENTOS DEL LAGO DE ATITLÁN



MANUEL ALEJANDRO MUÑOZ WUG

QUÍMICO

Guatemala, noviembre de 2016.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y FARMACIA

**CUANTIFICACIÓN DE METALES (COBRE, CADMIO, PLOMO, ZINC, CROMO
Y NÍQUEL), EN NÚCLEOS DE SEDIMENTOS DEL LAGO DE ATITLÁN**

Proyecto de Investigación

Presentado por

MANUEL ALEJANDRO MUÑOZ WUG

Para optar al título de

Químico

Guatemala, noviembre de 2016.

MIEMBROS DE JUNTA DIRECTIVA

| | |
|---|------------|
| Dr. Rubén Dariel Miranda Velásquez | Decano |
| M.A. Elsa Julieta Salazar Meléndez de Ariza | Secretario |
| M.Sc. Miriam Carolina Guzmán Quilo | Vocal I |
| Dr. Juan Francisco Pérez Sabino | Vocal II |
| Lic. Carlos Manuel Maldonado Aguilera | Vocal III |
| Br. Andreína Delia Irene López Hernández | Vocal IV |
| Br. Carol Andrea Betancourt Herrera | Vocal V |

DEDICATORIA

A DIOS Y MI FAMILIA

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad de San Carlos de Guatemala, por ser mi Alma Mater

A la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia y a la Escuela de Química por todo el conocimiento brindado.

Al Departamento de Análisis Inorgánico y a la Unidad de Análisis Instrumental, por permitirme realizar esta investigación.

A: Dr. Francisco Pérez, Licda. Bessie Oliva, M.Sc. Nohemí Orozco, M.A. Rodolfo Orozco y Lic. Eduardo Robles, Lic. Francisco Barrios, M.Sc. Ricardo Véliz por su apoyo incondicional que me brindaron durante mi formación profesional.

Y a todas aquellas personas que de manera directa e indirecta contribuyeron a mi formación integral.

ÍNDICE

Contenido

| | | |
|-------|--|----|
| I. | ÁMBITO DE LA INVESTIGACIÓN | 1 |
| II. | RESUMEN..... | 2 |
| III. | ANTECEDENTES..... | 3 |
| A. | LAGO DE ATITLÁN | 3 |
| B. | SEDIMENTOS Y NÚCLEOS DE SEDIMENTOS..... | 5 |
| C. | TOXICOLOGÍA DE LOS METALES OBJETO DE ESTUDIO | 6 |
| D. | ESTUDIOS PREVIOS: | 9 |
| IV. | JUSTIFICACIÓN..... | 13 |
| V. | OBJETIVOS | 14 |
| VI. | HIPÓTESIS..... | 14 |
| VII. | MATERIALES Y MÉTODOS..... | 15 |
| VIII. | AVAL GRUPO DE INVESTIGACIÓN AMBIENTAL | 20 |
| IX. | RESULTADOS..... | 21 |
| X. | DISCUSIÓN DE RESULTADOS..... | 40 |
| XI. | CONCLUSIONES | 45 |
| XII. | RECOMENDACIONES | 46 |
| XIII. | REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 47 |
| XIV. | ANEXOS | 51 |

I. ÁMBITO DE LA INVESTIGACIÓN

La investigación desarrollada forma parte del proyecto denominado Evaluación del Impacto de la Contaminación Antropogénica sobre Ecosistemas Acuáticos de Guatemala por Técnicas Analíticas Nucleares. Dicho proyecto tiene como objetivo apoyar la integridad ecológica y suministro de agua dulce para el consumo humano, a través de la identificación de causas y efectos de la contaminación antropogénica en los principales ecosistemas acuáticos, utilizando técnicas analíticas nucleares y relacionadas.

El proyecto macro propone realizar un diagnóstico de los niveles de contaminación en los lagos de Atitlán, Petén Itzá e Izabal, la cantidad y tipo de contaminantes provenientes de sus principales tributarios. Esto se realiza por medio de la medición de radiactividad, cianotoxinas, microcontaminantes orgánicos y metales tóxicos en varios compartimentos ambientales. Los metales son determinados por espectrometría de absorción atómica y cromatografía líquida de alta resolución para determinar cianotoxinas y algunos microcontaminantes orgánicos.

En ese contexto, la investigación realizada abarcó la cuantificación de metales ecotóxicos en muestras de núcleos de sedimentos colectados en el Lago de Atitlán, por medio de la técnica de espectrometría de absorción atómica, realizando la descripción así como la interpretación de los resultados encontrados. Los metales analizados por esta técnica en el proyecto macro y esta investigación son plomo, cadmio, cobre, zinc, cromo y níquel.

II. RESUMEN

El propósito de la investigación fue intercomparar las concentraciones de metales ecotóxicos presentes en las secciones de cada núcleo y entre núcleos, para interpretar los cambios en los niveles de contaminantes que han ocurrido en el pasado reciente en la cuenca del Lago de Atitlán. Para esto, se determinaron metales (plomo, níquel, cromo, cobre, zinc y cadmio) en secciones de cinco núcleos de sedimentos colectados en el Lago de Atitlán (dos núcleos pertenecen al área de Las Cristalinas, en el municipio de San Juan La Laguna y tres al área de Santiago Atitlán). Los sedimentos se digirieron por vía húmeda asistida por microondas, cuantificándose los metales por espectrometría de absorción atómica (Thermo Solaar S). Los sedimentos analizados del Lago de Atitlán, se encuentran contaminados por plomo con un valor promedio de 2.49 mg/Kg, éste no presenta una tendencia, el cromo, níquel y zinc se encuentran presentes en concentraciones promedio de 2.41 mg/Kg, 10.68 mg/Kg y 49.52 mg/Kg respectivamente, con una tendencia a ir aumentando con el transcurrir del tiempo, el cobre con un valor medio de 23.98 mg/Kg, éste presenta dos comportamientos, en el área de San Juan la Laguna tiende a disminuir con en transcurrir del tiempo caso contrario en el área de Santiago Atitlán, el cadmio no se detectó en ninguna de las secciones de sedimentos analizados, límite de detección 0.11 mg/Kg.

III. ANTECEDENTES

A. LAGO DE ATITLÁN

De acuerdo con datos e información de la Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca del lago de Atitlán y su Entorno -**AMSCLAE**- (Romero, 2011), las características principales del Lago de Atitlán son las siguientes:

1. Es un lago tropical.
2. Lago Oligotrófico.
3. Por su volumen se le identifica como el lago más grande del país.
4. Su volumen de agua almacenada alcanza los 24.4 Km³.
5. Su profundidad máxima se ha calculado en 324 metros.
6. Su profundidad promedio corresponde a los 187.69 metros.
7. El Área de Espejo de Agua es de 130 Km².
8. El Área de su cuenca es de 541 Km².
9. Su agua es sódica-magnésica-cálcica-bicarbonatada¹.
10. La Cuenca del Lago de Atitlán alberga permanentemente a 217,888 personas (según datos estadísticos del 2011).
11. La densidad de población en la cuenca corresponde a 530 personas por Km².
12. La tasa de deforestación en la cuenca del Lago de Atitlán asciende al 2.72% anual.
13. El lago recibe 450,196 m³ al año de aguas residuales.
14. Al año, el lago recibe 5,182 m³ de aguas mieles.
15. La cantidad de basura que recibe al año es de 1,928 Tm.

El Lago de Atitlán es un cuerpo de agua altamente amenazado, permanente y constantemente contaminado, (Romero, 2011). Oliva y colaboradores (2009), efectuaron el estudio de contaminantes ecotóxicos en agua y organismos acuáticos del Lago de Atitlán, destacando que:

¹ A pesar de ser sus aguas Na-Mg-Ca-HCO₃, pareciera ser un cuerpo de agua marina, pero es de agua dulce.

“Desde la década de 1980 los niveles de contaminación se han incrementado en el agua del Lago de Atitlán, como producto de la actividad humana en la cuenca. Así, el aumento de la población ha provocado una mayor descarga de aguas residuales sin tratamiento, la tala de la cobertura boscosa, con el consiguiente arrastre del suelo por la escorrentía en la estación lluviosa, y el aumento en el uso de detergentes y fertilizantes, lo cual ha provocado el aumento en la concentración de nutrientes en el lago.”. (p.1)

Otros datos y rasgos importantes y de interés son los siguientes:

1. El Lago de Atitlán se ubica en el departamento de Sololá².
2. A 1,562 metros sobre el nivel del mar se encuentra la superficie del Lago de Atitlán.
3. Las desembocaduras del Lago de Atitlán están constituidas por fisuras subterráneas y rezumaderos³ que desembocan en el Océano Pacífico.
4. Los afluentes principales del Lago de Atitlán son los ríos: Panajachel, Quisqab y San Buenaventura, todos ubicados en la parte norte del lago.
5. A orillas del Lago de Atitlán se ubican los poblados de: (Municipalidades, 2016)
 - a. Panajachel.
 - b. Santa Catarina Palopó.
 - c. San Antonio Palopó.
 - d. San Lucas Tolimán.
 - e. Santa Cruz La Laguna.
 - f. San Pablo La Laguna.
 - g. San Marcos La Laguna.
 - h. San Juan la Laguna.
 - i. San Pedro La Laguna.
 - j. San Jorge La Laguna.
 - k. Santiago Atitlán.
 - l. Santa Clara La Laguna.
 - m. Tzununa

² A 150 kilómetros de la ciudad capital de Guatemala.

³ El agua escapa por las faldas porosas de los volcanes (ubicados en la ribera sur del lago). En dicha ribera se localizan los volcanes Atitlán, Tolimán y San Pedro.

B. SEDIMENTOS Y NÚCLEOS DE SEDIMENTOS

Los sedimentos son una acumulación de derivados del substrato, suelo, restos orgánicos de una cuenca fluvial y partículas finas (transportadas por el viento o agua de lluvia) en el fondo de un cuerpo de agua, en el caso de los lagos con el pasar del tiempo se forma un depósito cada vez mayor de sedimentos. Estos depósitos acuáticos son capaces de preservar un registro de procesos y componentes ambientales pasados o actuales, tanto naturales como inducidos por el hombre, incluyendo la erosión de suelos, partículas transportadas por el aire o como solutos y materiales deslizados (Charles, 1994; Smol, 1995; Begerman, 2009).

Según Bejerman (2009) *“Algunos de estos cuerpos de agua son sistemas dinámicos y sensibles, cuyos depósitos sedimentarios preservan, en su composición química, física y biológica, un registro cronológicamente ordenado y comprensible de los cambios físicos y químicos a través de su estructura, mineralogía y geoquímica (por ejemplo: carbono orgánico, sílice biogénica, isótopos estables de oxígeno en carbonatos y celulosa, trazas de metales). Son de particular valor para la determinación de los datos a largo plazo referidos a la química de aguas, los restos de organismos acuáticos (como las diatomeas, crisófitas, quironómides y otras algas e invertebrados), los cuales pueden ser correlacionados con diversos parámetros ambientales. Adicionalmente, el polen fósil, las esporas y semillas reflejan la vegetación antigua, tanto terrestre como acuática. Los depósitos sedimentarios pueden, de este modo, proveer una indicación del grado y la naturaleza del impacto de eventos pasados sobre el sistema, así como una línea de base para compararlos con los cambios ambientales contemporáneos.”*. (p.1, capítulo 14)

Los núcleos de sedimentos consisten en cortes tridimensionales verticales (columnas o testigo) de los depósitos de sedimentos, de longitud variada, los cuales pueden ser desde varios cm hasta varios metros (Páez, 1984).

C. TOXICOLOGÍA DE LOS METALES OBJETO DE ESTUDIO

Bioacumulación:

Proceso en el cual los organismos absorben un contaminante ya sea de forma directa (por el ambiente contaminado) o indirecta (por alimentación contaminada) y éste es asimilado y retenido, provocando que el contaminante se acumule hasta alcanzar una concentración crítica provocando un efecto deletéreo en el organismo (Oliva et al., 2009).

Metales ecotóxicos bioacumulables:

Los metales como el zinc, hierro, manganeso, cobre, cobalto y molibdeno son esenciales en los organismos, éstos se encuentran en cantidades muy pequeñas (del orden de partes por billón a partes por millón). El mercurio, plomo y cadmio, entre otros, presentan un comportamiento bioacumulativo (Oliva et al., 2009; Esteves, 1988).

De acuerdo a Oliva et al., (2009), Los metales ecotóxicos que son bioacumulables, se alojan de manera fácil en la materia orgánica rica en nitrógeno y azufre. “Su toxicidad se debe principalmente a su capacidad de interferir en reacciones enzimáticas (bloqueando, desplazando el ión esencial o modificando la conformación activa de las biomoléculas como proteínas y enzimas) y también a su baja movilidad, en virtud de las pequeñas dimensiones y de las cargas dobles y triples (número de oxidación). Esta movilidad débil hace que se acumulen, modificando profundamente el metabolismo del organismo”.

C.1. Cadmio

Debido a su reactividad éste no se encuentra nativo en la corteza terrestre, se encuentra asociado al zinc. Se bioacumula en los tejidos de organismos de agua dulce, en el caso de los peces se aloja en las branquias, hígado y riñones. Los organismos que han ingerido cadmio por periodos prolongados pueden padecer de: presión sanguínea alta, daño en los nervios, hígado, riñones, infertilidad, posible daño en el ADN y cerebro (Oliva et al., 2009; Emsley, 2002; Wright, 2003; Greenwood, 1997).

C.2. Plomo

Se encuentra de manera natural sobre la corteza terrestre. El uso que se tiene del plomo en la industria es bastante y variado, por ejemplo: placas para baterías, tuberías, municiones, aleaciones, blindaje contra radiación, entre otros. Los peces de agua dulce contienen aproximadamente 0.5-1000 partes por billón (ppb); el plomo reacciona con el oxígeno del aire produciendo óxido de plomo el cual en presencia de agua reacciona para formar el hidróxido de plomo el cual se solubiliza en agua blanda y ligeramente ácida. El plomo en las plantas limita la síntesis de clorofila, sin embargo ellas pueden absorber grandes cantidades de plomo (hasta 500 ppm). El plomo orgánico causa necrosis de neuronas. El plomo inorgánico crea degeneración axónica. Ambas especies de plomo causan edema cerebral y congestión. Los compuestos orgánicos del plomo se absorben rápidamente y por lo tanto suponen un mayor riesgo. Los compuestos orgánicos del plomo pueden ser cancerígenos. Las mujeres son generalmente más susceptibles al envenenamiento que los hombres. El plomo causa alteraciones menstruales, infertilidad y aumenta el riesgo de aborto. Los fetos son más susceptibles al envenenamiento por plomo que las madres, e incluso los fetos protegen a la madre del envenenamiento por plomo (Oliva et al., 2009; Emsley, 2002; Wright, 2003; Greenwood, 1997).

C.3. Cromo

El cromo con estado de valencia III, es un elemento esencial para los humanos; sin embargo el cromo VI es tóxico, entre los problemas de salud que este puede provocar, destacan los siguientes: erupciones cutáneas, malestar de estómago y úlceras, problemas respiratorios, debilitamiento del sistema inmune, daño en los riñones e hígado, alteración del material genético, cáncer de pulmón, incluso la muerte. No es conocido que el cromo se acumule en los peces, pero altas concentraciones de cromo, debido a su disponibilidad en las aguas superficiales, pueden dañar las agallas de los peces que nadan cerca del punto de vertido (Oliva et al., 2009; Emsley, 2002; Wright, 2003; Greenwood, 1997).

C.4. Níquel

El níquel es abundante en la corteza terrestre (0.008%) y en las rocas ígneas (0.01%). Se sabe que las plantas acumulan níquel por lo tanto la ingesta de níquel de los vegetales será inminente. Los fumadores tiene un alto grado de exposición al níquel a través de sus pulmones; los problemas de salud que causa el níquel en el ser humano son de carácter puntual, es decir: si se inhala daña el sistema respiratorio, si la piel entra en contacto con vapores de níquel la dermis será afectada. La mayor parte de todos los compuestos del níquel que son liberados al ambiente se absorberán por los sedimentos o partículas del suelo y llegará a inmovilizarse. En suelos ácidos, el níquel se une para llegar a ser más móvil y a menudo alcanza el agua subterránea (Oliva et al., 2009; Emsley, 2002; Wright, 2003; Greenwood, 1997).

C.5. Zinc

El lodo que proviene de las plantas de tratamiento de aguas residuales se aplica en agricultura, horticultura y silvicultura, y por lo tanto las concentraciones de zinc no deben sobrepasar los límites de 3 g/kg. Las pruebas ecotoxicológicas establecen como niveles de zinc disuelto, concentraciones de 50 µg/L PNEC, es decir concentraciones totales de 150-200 µg/L de zinc en agua. Este valor PNEC representa la concentración máxima con la cual no se producen efectos en el medioambiente (Predicted No Effect Concentration). El cuerpo humano contiene aproximadamente 2.3 g de zinc. Sus funciones incluyen principalmente procesos enzimáticos y réplica de ADN. El zinc también disminuye la adsorción del plomo. Los síntomas de sobredosis de zinc incluyen: náuseas, vómitos, diarreas, cólicos y fiebre, y en la mayor parte de los casos estos síntomas se dan tras consumos de 4-8 g de zinc. Los consumos de 2 g de sulfato de zinc provocan toxicidad aguda que provocan dolores de estómago y vómitos. Algunos ejemplos de efectos en la salud atribuidos al zinc incluyen infección de las mucosas por cloruro de zinc (dosis letal

3-5 g), y envenenamiento por vitriolo (dosis letal 5 g) (Oliva et al., 2009; Emsley, 2002; Wright, 2003; Greenwood, 1997).

C.6. Cobre

El cobre es una sustancia muy común que ocurre naturalmente y se extiende a través del ambiente a través de fenómenos naturales. El cobre es utilizado ampliamente, por ejemplo este es aplicado en industrias y en agricultura. La producción de cobre se ha incrementado en las últimas décadas y debido a esto las concentraciones de este metal se han incrementado en el ambiente. Las personas que viven en casas que todavía tiene tuberías de cobre están expuestas a más altos niveles del metal que la mayoría de la gente, porque éste es liberado en sus aguas a través de la corrosión de las tuberías. En el ambiente de trabajo el contacto con cobre puede llevar a producir gripe conocida como la fiebre del metal. Esta fiebre pasará después de dos días y es causada por una sobre sensibilidad.

Exposiciones de largo periodo al cobre pueden irritar la nariz, la boca y los ojos y causar dolor de cabeza, de estómago, mareos, vómitos y diarreas. Una ingesta grande de cobre puede causar daño al hígado y los riñones e incluso la muerte. Aún no se ha determinado si el cobre es cancerígeno. (Oliva et al., 2009; Emsley, 2002; Wright, 2003; Greenwood, 1997).

D. ESTUDIOS PREVIOS:

Entre los realizadores institucionales de los estudios en el Lago de Atitlán están los siguientes:

- El Centro de Estudios del Mar y Acuicultura de la Universidad de San Carlos de Guatemala.
- La Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca del Lago de Atitlán y su Entorno (**AMSCLAE**).
- La Universidad del Valle de Guatemala.

- Escuela de Química de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Entre las instituciones estatales que financian investigaciones están:

- La Dirección General de Investigación de la Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Secretaría Nacional de Ciencia y Tecnología, SENACYT.

Durante las últimas cuatro décadas se realizaron muchos y variados estudios acerca del Lago de Atitlán, entre ellos se encuentran los efectuados por Margareth Dix en los años 1970, estudiando los niveles de oxígeno disuelto en agua y análisis de fitoplancton. El Centro de Estudios del Mar y Acuicultura de la Universidad de San Carlos ha efectuado algunos estudios, entre ellos varias tesis *ad gradum*. Se han determinado los niveles de diferentes especies químicas, entre ellas, los nutrientes. Así mismo, se han efectuado estudios sobre los peces en el lago. En 1983 se observaron notables incrementos en los niveles de fitoplancton, con respecto a estudios efectuados en 1976 y 1968, lo que evidencia el deterioro drástico que ha sufrido la calidad del agua del lago de Atitlán en plazos relativamente cortos (La Bastille, 1988; Rejmankova, 2010).

La Universidad del Valle de Guatemala -UVG- realizó desde 2000 a 2003, monitoreos de la calidad del agua, en 28 sitios del lago de Atitlán. Se encontró que en general la calidad fisicoquímica del agua era bastante buena, sin embargo los parámetros bacteriológicos presentaban niveles variables de contaminación bacteriana (Castellanos et al., 2002).

En el estudio de contaminantes ecotóxicos en agua y organismos acuáticos del Lago de Atitlán realizado por el Grupo de Investigación Ambiental (GIA) de la Escuela de Química, con financiamiento de la Dirección General de Investigación (DIGI) de la Universidad de San Carlos de Guatemala, se incluyó el tema de los metales ecotóxicos bioacumulables como el cadmio, plomo, cobre y zinc. La lista de hallazgos del estudio en la cuenca incluye:

- Estratificación termal.

- Déficit de oxígeno en el fondo.
- Cambios en conductividad eléctrica según la profundidad.
- Valores diversos de transparencia de las aguas.
- Presencia de bicarbonato de calcio, sulfato de calcio y magnesio.
- El agua del lago de Atitlán no es apta para el consumo humano por causa de la presencia elevada de coliformes fecales.
- Zonas del lago próximas a centros urbanos, expuestas a la descarga desmedida de aguas residuales.
- Peligro de eutrofización por causa del enriquecimiento de nutrientes, provocado por el crecimiento excesivo de algas.
- Identificación de descarga de aguas residuales, actividades agrícolas que conllevan el empleo de fertilizantes, pastoreo de animales y lavaderos comunales, como las principales fuentes de contaminación del lago.

(Oliva et al., 2009)

Ruiz y Axpuaca (2014), reportaron la presencia de metales ecotóxicos bioacumulables como el cadmio, plomo, cobre y zinc en muestras de sedimentos superficiales provenientes de los ríos Panajachel, Quiscab y San Buenaventura. También se ha determinado que las aguas superficiales poseen mercurio y arsénico en puntos de muestreo cercanos a poblados asentados a orillas del lago, los valores de mercurio se encuentran en promedio de 3.0 µg/L y de arsénico en 20.0 µg/L (Pérez et al., 2015)

A nivel internacional se ha determinado la presencia de metales ecotóxicos en sedimentos de lagos, ríos, estuarios y lagunas. Tal es el estudio de la región del lago Vanda en la Antártida en la cual se encontraron los siguientes metales ecotóxicos en sedimentos superficiales costeros: Cu (26 mg/Kg), Pb (4.2 mg/Kg), Zn (22 mg/Kg), Ni (10 mg/Kg) y Cd (0.12 mg/Kg), estos niveles reflejan el bajo impacto antropogénico por no ser una región muy poblada (Webster, 2007). En el lago Titicaca se determinó la presencia de Cu (41 mg/Kg), Pb (74.97 mg/Kg), Zn (323.24 mg/Kg), y Cd (1.98 mg/Kg) (Monroy, 2014). En el estuario del río Hudson se analizaron sedimentos a diferentes distancias del océano

encontrándose que a los 16 Km se encuentra el punto con mayor cantidad de metales ecotóxicos entre ellos: Cu (100 mg/Kg), Pb (140 mg/Kg), Zn (215 mg/Kg), Cr (110 mg/Kg), Ni (21 mg/Kg) y Cd (10 mg/Kg) (Gibbs, 1994). Otro estuario estudiado fue el de los ríos Tintos y Odiel en Huelva (España), en el cual los metales ecotóxicos analizados en sedimentos superficiales (2-20 cm de profundidad) del Canal del Padre Santo reflejan los siguientes valores: Cu (2215.11 mg/Kg), Pb (630.03 mg/Kg), Zn (1430.67 mg/Kg), y Cd (7.09 mg/Kg) (Vicente, 2008).

IV. JUSTIFICACIÓN

La caracterización de los diferentes compartimentos ambientales de los ecosistemas lacustres constituye una herramienta indispensable para la formulación, evaluación y adaptación de políticas y prácticas de manejo integrado de las cuencas de los lagos. En Guatemala, la investigación de la calidad del agua de los lagos ha sido el primer paso y en las últimas décadas se ha acumulado información relevante que contribuye al análisis de estado y tendencias. Sin embargo, otros compartimentos ambientales aún deben ser investigados para completar el diagnóstico de la situación de estos cuerpos de agua.

Hasta el momento, hay escasez de información sistematizada sobre las concentraciones de metales en sedimentos de los lagos de Guatemala. En ese contexto, la presente investigación constituye un aporte para cerrar la brecha de conocimientos en este campo al determinar las concentraciones de metales ecotóxicos (plomo, cadmio, zinc, cobre, níquel y cromo) en diferentes estratos de sedimentos del lago de Atitlán.

Dada la capacidad de los sedimentos de constituirse en una especie de registro de las condiciones pasadas de los cuerpos de agua a los que pertenecen, los resultados de la presente investigación complementan los datos actuales de calidad de agua del lago de Atitlán. Los resultados de este trabajo permitirán observar un fragmento de la historia de este lago y, al combinarlos con los datos de otras investigaciones asociadas, se podrá analizar en retrospectiva las tendencias en cuanto a la acumulación de metales ecotóxicos en sedimentos y posiblemente identificar factores que han incidido en los comportamientos observados.

V. OBJETIVOS

1. General:

- a) Cuantificar metales ecotóxicos (plomo, cadmio, cobre, zinc, níquel y cromo) presentes en muestras de núcleos de sedimentos del lago de Atitlán por espectroscopia de absorción atómica.

2. Específicos:

- a) Digerir las secciones de núcleos de sedimentos del Lago de Atitlán por vía húmeda asistida por microondas
- b) Cuantificar metales ecotóxicos disponibles tales como: plomo, cadmio, níquel, cobre, zinc y cromo en las secciones que conforman los núcleos de sedimentos del lago de Atitlán por medio de la técnica de espectroscopia de absorción atómica.
- c) Intercomparar las concentraciones de metales ecotóxicos presentes en las secciones de cada núcleo y entre núcleos de sedimentos colectado.

VI. HIPÓTESIS

Las secciones superiores de núcleos de sedimentos del Lago de Atitlán presentan mayores concentraciones de metales ecotóxicos que las inferiores.

VII. MATERIALES Y MÉTODOS

A. MATERIALES Y REACTIVOS

Limpieza de cristalería y recipientes de almacenaje de muestras

- i. 250 mL de ácido nítrico concentrado, grado reactivo.
- ii. 10 litros de agua desmineralizada, marca SALVAVIDAS
- iii. 100 mL de Extran alcalino, marca MERCK
- iv. Un recipiente de vidrio con capacidad de 5 galones.
- v. Una piseta.
- vi. 100 mL de acetona.

Secado y almacenaje de secciones de sedimentos

- i. Un horno eléctrico de convección
- ii. Una desecadora con sílica gel con indicador de humedad
- iii. Un mortero con pistilo
- iv. Setenta y cinco bolsas plásticas herméticas
- v. Setenta recipientes de aluminio

Digestión de sedimentos

- i. Un sistema de digestión de microondas, marca MILESTONE, modelo: START D.
- ii. 400 mL ácido nítrico concentrado, grado reactivo.
- iii. 100 mL de peróxido de hidrógeno al 30%, grado reactivo
- iv. Una balanza analítica, marca RADWAG
- v. Una espátula de acero inoxidable, de 0.5 cm de ancho
- vi. Cuatro vidrios de reloj
- vii. 500 mL de agua desmineralizada, marca SALVAVIDAS
- viii. Setenta y cinco tubos de plástico tipo Falcon
- ix. Setenta y cinco tubos de contención de 10 mL de plástico

Cuantificación de metales ecotóxicos en sedimentos

- i. Un espectrofotómetro de absorción atómica, marca THERMO, modelo SOLAAR, serie S.
- ii. Siete balones aforados de 25 mL
- iii. Siete balones aforados de 50 mL
- iv. Un balones aforados de 100 mL
- v. 1.0 L de agua desmineralizada, marca SALVAVIDAS
- vi. Estándares de plomo, cadmio, cobre, zinc, níquel y cromo
- vii. Lámparas para espectrofotómetro de absorción atómica de plomo, cadmio, cobre, zinc, níquel y cromo

B. MÉTODOS

Limpieza de cristalería y recipientes de almacenaje de muestras

Todo el material que vaya a tener contacto con las muestras y material de referencia debe de ser limpiado cuantitativamente, según el siguiente procedimiento:

Lavado cuantitativo de material de vidrio y/o plástico:

- 1) Remojar todo el material en solución jabonosa al 1% v/v (emplear detergente libre de amoníaco y de metales), por 24 horas, para retirar macro impurezas.
- 2) Lavar con abundante agua del chorro para remover impurezas y el jabón.
- 3) Si el material contiene grasa o aceite que el detergente no pudo remover lavar con acetona y/o hexano.
- 4) Lavar con abundante agua del chorro.
- 5) Lavar tres veces el material por dentro y fuera con abundante agua desmineralizada.
- 6) Remojar por 24 horas en ácido nítrico al 10% v/v.
- 7) Enjuagar con abundante agua desmineralizada.
- 8) Dejar secar el material a la sombra, protegida del polvo y otros contaminantes

Secado y almacenaje de secciones de sedimentos

La toma de núcleos de sedimentos se realiza con un nucleador de bola de 0.6 m de largo y de 3 pulgadas de diámetro, el cual se lanza desde el borde del bote, el núcleo es recogido manualmente, este sistema puede coleccionar núcleos de 30 a 70 cm aproximadamente. Cada núcleo es dividido en secciones (fracciones) de 3 cm y/o cuando exista una marcada diferencia de color y/o textura (estrato diferenciado); cada sección se almacena en un recipiente plástico estéril y hermético.

Las secciones de sedimentos almacenadas se transfieren a recipientes de aluminio (previamente tarados en balanza semianalítica), luego se trasladan al horno de convección térmica a una temperatura de 45°C, por 96 horas. Pasado el tiempo la muestra es pulverizada en un mortero, con el fin de homogenizar la muestra. Las muestras se almacenan en bolsas plásticas herméticas y estériles.

Digestión de sedimentos y almacenaje de sedimentos digeridos:

Colocar una muestra representativa de hasta 0.25 g (idealmente entre 0.21 y 0.22 g) en el vaso de teflón del sistema de digestión del microondas, luego se adicionan 10 mL de ácido nítrico concentrado, dejar reaccionar por 10 minutos, pasado este tiempo agregar 2 mL de peróxido de hidrógeno, dejar reaccionar hasta que no se vean burbujas. Cerrar herméticamente el vaso, colocarlo en el microondas.

Condiciones del sistema de digestión del microondas: rampa de calentamiento de 0 a 180°C en 10 minutos, mantener la temperatura de 180°C por 10 minutos, ventilar hasta que la temperatura sea igual o inferior a 35°C.

Posterior a la digestión de la muestra esta se filtra con papel filtro Whatman cualitativo directamente sobre un balón aforado de 25 mL, el papel filtro se lava seis veces con agua desmineralizada, aforar con agua desmineralizada; se homogeniza la solución dentro del balón y se trasvasa a un tubo plástico falcón de 50 mL.

Cuantificación de metales en muestras de sedimentos digeridos:

Preparación de curva de calibración: preparar una curva de calibración por cada elemento a cuantificar en las muestras, a partir de soluciones estandarizadas y trazables. De cada estándar se prepara una solución intermedia, esto debe realizarse, para disminuir errores en las mediciones de estándar, si se preparan 100 mL de solución intermedia adicionar 40 mL de HNO₃ al 50% $\%_v$. A partir de la solución intermedia se preparan seis diluciones, las cuales constituirán la curva de calibración, si se preparan 50 mL de solución de cada estándar adicionar 20 ml de. HNO₃ al 50% $\%_v$.

Tabla No. 01. Concentraciones de los estándares para la elaboración de la curva de calibración para los metales de estudio, las concentraciones están en mg/L (ppm).

| Elemento | STD01 | STD02 | STD03 | STD04 | STD05 | STD06 |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Plomo | 0.20 | 0.40 | 0.80 | 1.20 | 1.60 | 2.00 |
| Cadmio | 0.05 | 0.10 | 0.20 | 0.30 | 0.40 | 0.50 |
| Cromo | 0.25 | 0.50 | 1.00 | 1.50 | 2.00 | 2.500 |
| Cobre | 0.10 | 0.20 | 0.40 | 0.60 | 0.80 | 1.00 |
| Níquel | 0.30 | 0.60 | 1.20 | 1.80 | 2.40 | 3.00 |
| Zinc | 0.05 | 0.10 | 0.20 | 0.30 | 0.40 | 0.50 |

Fuente: datos experimentales, Depto. análisis inorgánico. STD: estándar

Condiciones del espectrómetro de absorción atómica: aire y acetileno para la llama (para el cromo aire, acetileno y óxido nítrico), lámpara de cada elemento precalentadas por 30 minutos.

Cuantificación de metales: la curva de calibración se introduce en el equipo para registrar la absorbancia (por triplicado) de cada punto de la curva; luego se determina la absorbancia (por triplicado) de cada muestra. Por medio del método de mínimos cuadrados, se establece la relación absorbancia-concentración, con la cual a partir de la absorbancia de cada muestra se puede determinar la concentración del analito. Para que una curva de calibración

sea tomada como válida se considera que el coeficiente de correlación lineal (o ajuste) debe ser mayor o igual a 0.9900.

Reportar resultados:

Los resultados de metales en una matriz sólida normalmente se reportan como miligramos del metal en un kilogramo de material seco (mg/Kg), la fórmula a emplear es la siguiente:

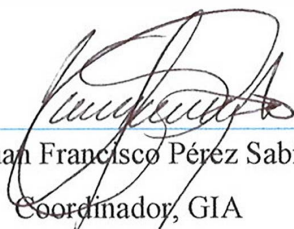
$$[mg/Kg] = \frac{(Abs_{muestra} - \bar{X}Abs_{blanco})(Volumen_{balón\ aforado})(factor\ de\ dilución)(1000)}{\text{peso de la muestra en gramos}}$$

Nota: la digestión de muestras se realizaron por duplicado al igual que el blanco, las lecturas en el espectrómetro de absorción atómica se realizaron por triplicado.

VIII. AVAL DE LA UNIDAD DE INVESTIGACIÓN

En cumplimiento al INSTRUCTIVO PARA LA EVALUACION TERMINAL DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y FARMACIA EN SU MODALIDAD DE “PROYECTO DE INVESTIGACIÓN”

Se extiende el presente aval a: MANUEL ALEJANDRO MUÑOZ WUG, para la publicación de los resultados obtenidos en la investigación titulada: “CUANTIFICACIÓN DE METALES (COBRE, CADMIO, PLOMO, ZINC, CROMO Y NÍQUEL), EN NÚCLEOS DE SEDIMENTOS DEL LAGO DE ATITLÁN”, los cuáles constituyen resultados parciales del Proyecto de Investigación Macro denominado: “Evaluación del Impacto de la Contaminación Antropogénica sobre Ecosistemas Acuáticos de Guatemala por Técnicas Analíticas Nucleares”, que realiza el Grupo de Investigación Ambiental -GIA-.



Dr. Juan Francisco Pérez Sabino

Coordinador, GIA

IX. RESULTADOS

Identificación de las muestras:

Tabla No.2. Ubicación y fecha de colecta de los núcleos de sedimentos trabajados.

| Descripción | Fecha colectado | Secciones | Datos GPS |
|--|-----------------|-----------|------------------------------|
| Núcleo I, Las Cristalinas, San Juan la Laguna | 04/04/2014 | 11 | 14°42'21.2"N 91°18'09.3"W |
| Núcleo II, Las Cristalinas, San Juan la Laguna | 04/04/2014 | 08 | 14°42'19.7"N 91°17'09.6"W |
| Núcleo I, Santiago Atitlán | 13/11/2013 | 04 | 14°37'51.6"N 91°14'31.3"W |
| Núcleo II, Santiago Atitlán | 13/11/2013 | 04 | 14°37'49.4"N 91°14'32.1"W |
| Núcleo III, Santiago Atitlán | 13/11/2013 | 06 | 14°37'53.2"N 91°14'33.9"W |

Fuente: Datos experimentales, sistema de posicionamiento global marca GARMIN, modelo: GPSmap, serie: 60CSx.

Curvas de calibración:

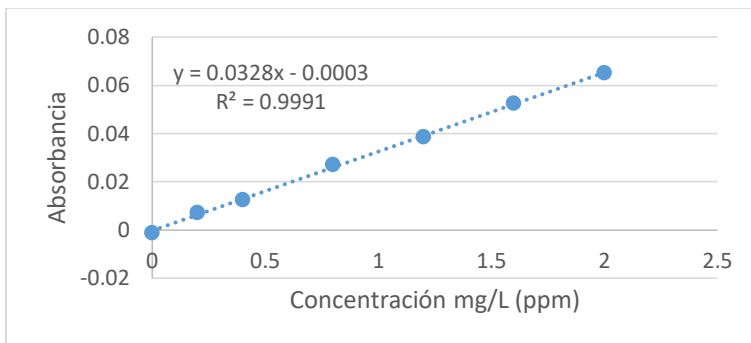
1) Plomo:

Tabla No. 3. Datos curva de calibración para plomo

| Identificación | Señal (absorbancia) | Concentración (mg/L) |
|----------------|---------------------|----------------------|
| Blanco | -0.00126 | 0.0000 |
| Estándar 1 | 0.00712 | 0.2000 |
| Estándar 2 | 0.01239 | 0.4000 |
| Estándar 3 | 0.02693 | 0.8000 |
| Estándar 4 | 0.03852 | 1.2000 |
| Estándar 5 | 0.05238 | 1.6000 |
| Estándar 6 | 0.06504 | 2.0000 |

Fuente: datos experimentales, Departamento Análisis Inorgánico

Gráfica No. 1. Curva de calibración para plomo



Fuente: tabla No. 3

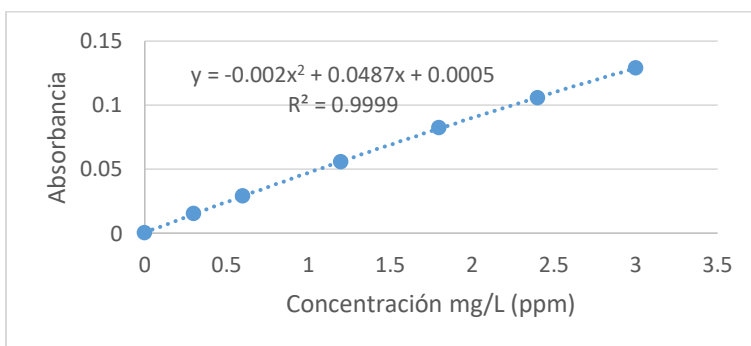
2) Níquel:

Tabla No. 4. Datos curva de calibración para níquel

| Identificación | Señal (absorbancia) | Concentración (mg/L) |
|----------------|---------------------|----------------------|
| Blanco | 0.00047 | 0.0000 |
| Estándar 1 | 0.01508 | 0.3000 |
| Estándar 2 | 0.02879 | 0.6000 |
| Estándar 3 | 0.05564 | 1.2000 |
| Estándar 4 | 0.08239 | 1.8000 |
| Estándar 5 | 0.10547 | 2.4000 |
| Estándar 6 | 0.12877 | 3.0000 |

Fuente: datos experimentales, Departamento Análisis Inorgánico

Gráfica No. 2. Curva de calibración para níquel



Fuente: tabla No. 4

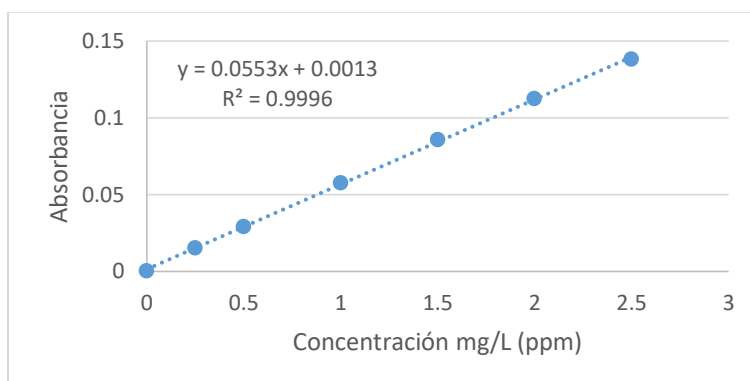
3) Cromo:

Tabla No. 5. Datos curva de calibración para cromo

| Identificación | Señal (absorbancia) | Concentración (mg/L) |
|----------------|---------------------|----------------------|
| Blanco | 0.00018 | 0.0000 |
| Estándar 1 | 0.01513 | 0.2500 |
| Estándar 2 | 0.02885 | 0.5000 |
| Estándar 3 | 0.05754 | 1.0000 |
| Estándar 4 | 0.08557 | 1.5000 |
| Estándar 5 | 0.11221 | 2.0000 |
| Estándar 6 | 0.13819 | 2.5000 |

Fuente: datos experimentales, Departamento Análisis Inorgánico

Gráfica No. 3. Curva de calibración para cromo



Fuente: tabla No. 5

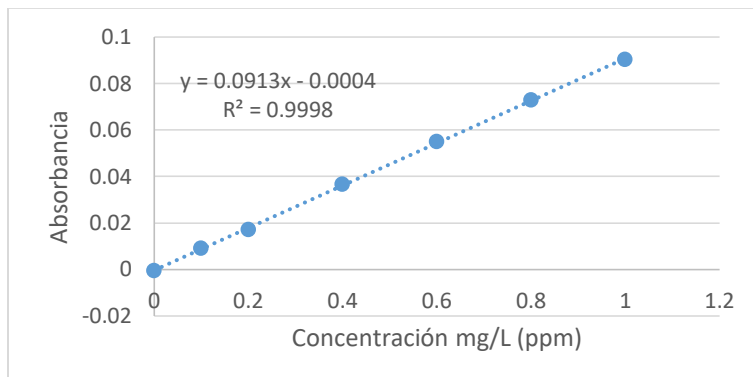
4) Cobre:

Tabla No. 6. Datos curva de calibración para cobre.

| Identificación | Señal (absorbancia) | Concentración (mg/L) |
|----------------|---------------------|----------------------|
| Blanco | -0.00065 | 0.0000 |
| Estándar 1 | 0.00896 | 0.1000 |
| Estándar 2 | 0.01712 | 0.2000 |
| Estándar 3 | 0.03654 | 0.4000 |
| Estándar 4 | 0.05493 | 0.6000 |
| Estándar 5 | 0.07273 | 0.8000 |
| Estándar 6 | 0.09027 | 1.0000 |

Fuente: datos experimentales, Departamento Análisis Inorgánico

Gráfica No. 4. Curva de calibración para cobre



Fuente: tabla No. 6

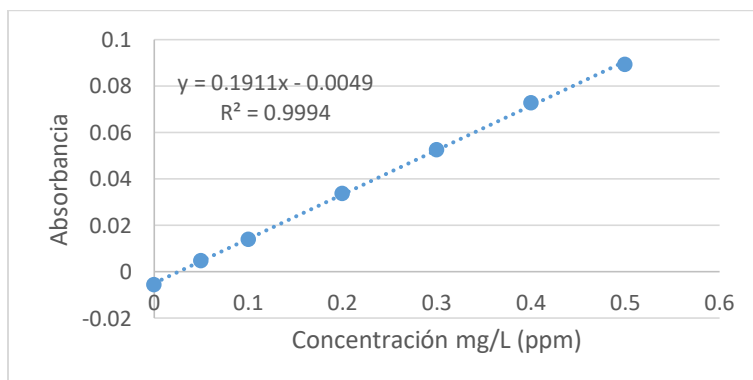
5) Zinc:

Tabla No. 7. Datos curva de calibración para zinc.

| Identificación | Señal (absorbancia) | Concentración (mg/L) |
|----------------|---------------------|----------------------|
| Blanco | -0.00559 | 0.0000 |
| Estándar 1 | 0.00480 | 0.0500 |
| Estándar 2 | 0.01397 | 0.1000 |
| Estándar 3 | 0.03380 | 0.2000 |
| Estándar 4 | 0.05246 | 0.3000 |
| Estándar 5 | 0.07281 | 0.4000 |
| Estándar 6 | 0.08927 | 0.5000 |

Fuente: datos experimentales, Departamento Análisis Inorgánico

Gráfica No. 5. Curva de calibración para zinc



Fuente: tabla No. 7

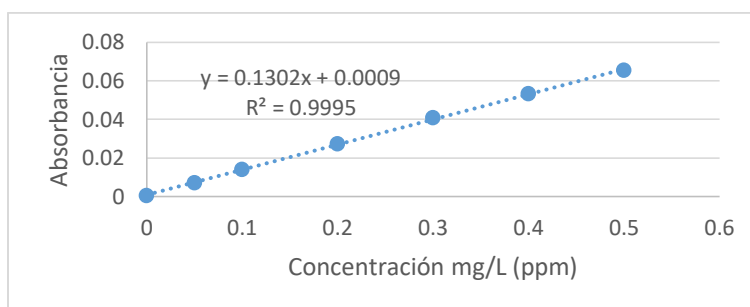
6) Cadmio:

Tabla No. 8. Datos curva de calibración para cadmio.

| Identificación | Señal (absorbancia) | Concentración (mg/L) |
|----------------|---------------------|----------------------|
| Blanco | 0.00053 | 0.0000 |
| Estándar 1 | 0.00715 | 0.0500 |
| Estándar 2 | 0.01399 | 0.1000 |
| Estándar 3 | 0.02735 | 0.2000 |
| Estándar 4 | 0.04079 | 0.3000 |
| Estándar 5 | 0.05317 | 0.4000 |
| Estándar 6 | 0.06524 | 0.5000 |

Fuente: datos experimentales, Departamento Análisis Inorgánico

Gráfica No. 6. Curva de calibración para cadmio



Fuente: tabla No. 8

Límites de detección y de cuantificación:

Tabla No. 09. Límites de detección y de cuantificación (mg/Kg) de los metales analizados empleando el espectrómetro de absorción atómica SOLAAR de Thermo:

| Límite/Metal | Plomo | Níquel | Cromo | Cobre | Zinc | Cadmio |
|----------------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------|
| Detección | 0.061±0.001 | 1.17±0.02 | 0.83±0.02 | 0.84±0.03 | 1.82±0.12 | 0.108±0.005 |
| Cuantificación | 0.204±0.001 | 3.91±0.02 | 2.76±0.02 | 2.79±0.03 | 6.08±0.12 | 0.361±0.005 |

Fuente: datos experimentales, Departamento de Análisis Inorgánico.

Material de referencia:

Tabla No. 10. Análisis de metales en material certificado de referencia: Sedimento IAEA-158.

| | Plomo | Níquel | Cromo | Cobre | Zinc | Cadmio |
|-------------|----------|----------|----------|----------|-----------|-------------|
| Certificado | 39.6±4.7 | 30.3±2.9 | 74.4±5.8 | 48.3±4.2 | 140.6±9.5 | 0.372±0.039 |
| Determinado | 23.9±1.3 | 35.1±0.8 | 39.2±0.2 | 38.7±0.5 | 127.7±0.6 | 0.323±0.024 |

Fuente: datos experimentales, Departamento Análisis Inorgánico

Tabla No. 11. Análisis de metales en material certificado de referencia: Proficiency test IAEA-CU-2010-02.

| | Plomo | Níquel | Cromo | Cobre | Zinc | Cadmio |
|-------------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| Certificado | 100±4 | 80±5 | 110±7 | 310±14 | 1800±60 | 1.78±0.12 |
| Determinado | 73.9±1.6 | 78.2±1.1 | 90.1±0.8 | 253.7±1.0 | 770.0±1.6 | 1.08±0.02 |

Fuente: datos experimentales, Departamento Análisis Inorgánico

Tabla No. 12. Análisis de metales en material certificado de referencia: TRACE ELEMENTS AND METHYLMERCURY IN FISH TISSUE IAEA-407.

| | Plomo | Níquel | Cromo | Cobre | Zinc | Cadmio |
|-------------|--------|--------|--------|------------|----------|--------|
| Certificado | 0.12± | 0.60± | 0.73± | 3.28±0.40 | 67.1±3.8 | 0.189± |
| Determinado | d.l.d. | d.l.d. | d.l.d. | <2.79±0.03 | 57.7±0.4 | d.l.d. |

Fuente: datos experimentales, Departamento Análisis Inorgánico. d.l.d.: debajo del límite de detección.

Concentración de metales en núcleos de sedimentos:

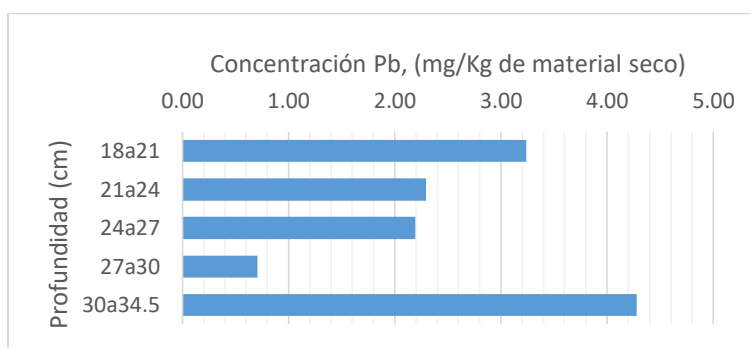
Tabla No. 13. Cuadro resumen de concentraciones de metales (mg/Kg de material seco) en secciones del núcleo I, Las Cristalinas San Juan la Laguna.

| Profundidad (cm) | Plomo | Níquel | Cobre | Cromo | Zinc | Cadmio |
|------------------|--------|------------|------------|-----------|------------|--------|
| 0a3 | d.l.d. | 4.75±0.35 | 14.87±0.33 | 4.28±0.22 | 50.78±0.59 | d.l.d. |
| 3a6 | d.l.d. | 7.03±0.68 | 16.90±0.64 | 4.71±0.09 | 51.84±0.45 | d.l.d. |
| 6a9 | d.l.d. | 6.06±0.77 | 17.31±0.53 | 4.01±0.28 | 47.98±0.78 | d.l.d. |
| 09a12 | d.l.d. | 5.36±0.36 | 21.28±0.38 | 3.95±0.12 | 49.69±2.13 | d.l.d. |
| 12a15 | d.l.d. | 5.350±0.87 | 26.37±0.60 | 1.82±0.16 | 50.22±0.39 | d.l.d. |

| | | | | | | |
|---------|-----------|-------------|------------|-----------|------------|--------|
| 15a18 | d.l.d. | 4.30±0.39 | 26.94±0.48 | 1.24±0.25 | 46.65±0.10 | d.l.d. |
| 18a21 | 3.24±1.74 | 4.82±0.32 | 27.34±0.87 | d.l.d. | 48.54±0.22 | d.l.d. |
| 21a24 | 2.29±1.62 | 4.52±0.69 | 27.79±0.33 | d.l.d. | 50.60±0.53 | d.l.d. |
| 24a27 | 2.19±2.06 | 4.45±0.75 | 27.85±0.40 | d.l.d. | 51.51±0.32 | d.l.d. |
| 27a30 | 0.71±1.84 | 4.58±0.69 | 28.68±0.50 | d.l.d. | 52.16±0.31 | d.l.d. |
| 30a34.5 | 4.282.04± | <3.91±0.019 | 31.55±0.44 | d.l.d. | 69.40±0.21 | d.l.d. |

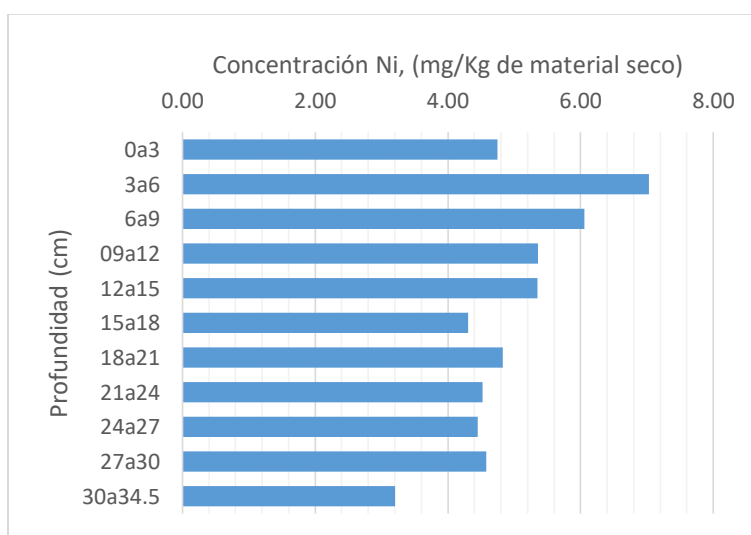
Fuente: datos experimentales, Departamento de Análisis Inorgánico; d.l.d.: debajo del límite de detección.

Gráfica No.7. Concentraciones de plomo en las distintas secciones del núcleo I, Las Cristalinas, San Juan la Laguna.



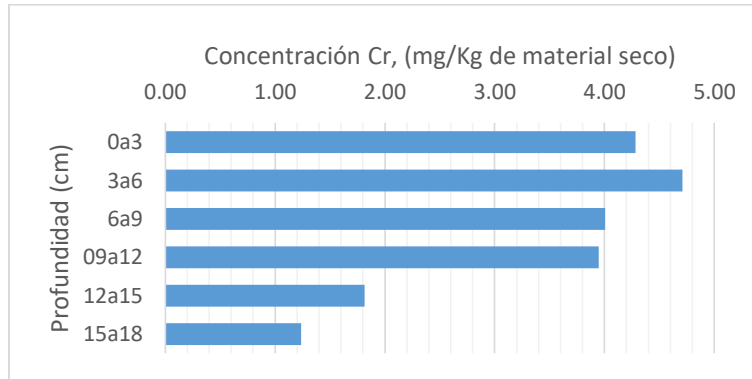
Fuente: tabla No. 13.

Gráfica No.8. Concentraciones de níquel en las distintas secciones del núcleo I, Las Cristalinas, San Juan la Laguna.



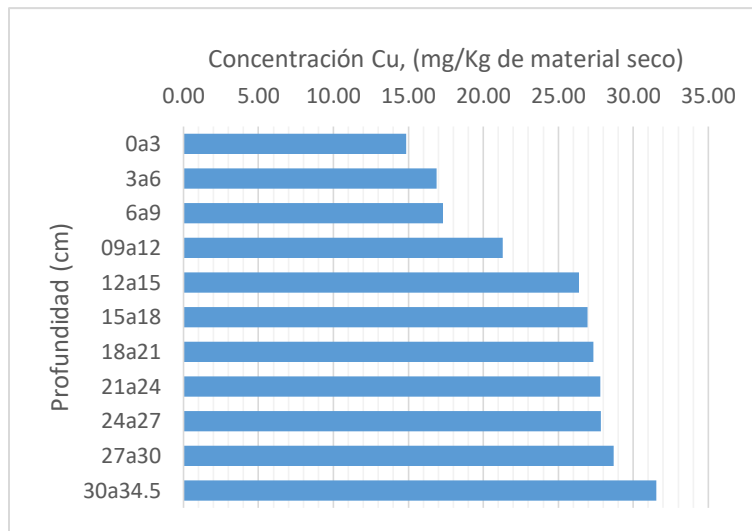
Fuente: tabla No. 13.

Gráfica No.9. Concentraciones de cromo en las distintas secciones del núcleo I, Las Cristalinas, San Juan la Laguna.



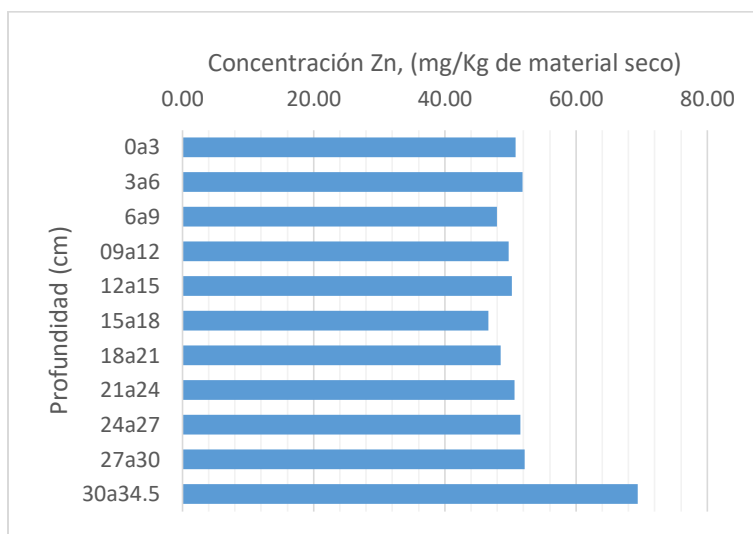
Fuente: tabla No. 13.

Gráfica No.10. Concentraciones de cobre en las distintas secciones del núcleo I, Las Cristalinas, San Juan la Laguna.



Fuente: tabla No. 13.

Gráfica No.11. Concentraciones de zinc en las distintas secciones del núcleo I, Las Cristalinas, San Juan la Laguna.



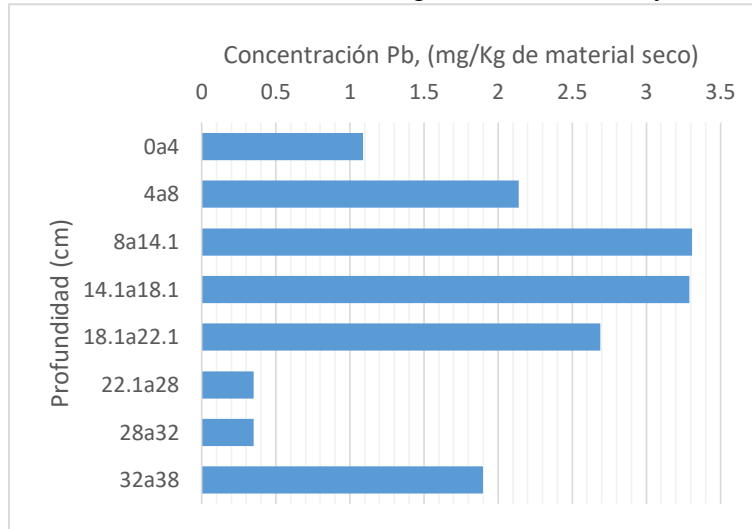
Fuente: tabla No. 13.

Tabla No. 14. Cuadro resumen de concentraciones de metales (mg/Kg de material seco) en secciones del núcleo II, Las Cristalinas, San Juan la Laguna, estratos 1, 2 y 3.

| Profundidad (cm) | Plomo | Níquel | Cobre | Cromo | Zinc | Cadmio |
|------------------|-----------|------------|------------|--------|------------|--------|
| 0a4 | 1.09±1.49 | 8.99±0.83 | 19.05±0.45 | d.l.d. | 57.59±0.62 | d.l.d. |
| 4a8 | 2.14±1.54 | 13.98±0.52 | 22.66±0.52 | d.l.d. | 52.92±0.25 | d.l.d. |
| 8a14.1 | 3.31±1.96 | 15.40±0.73 | 31.17±0.56 | d.l.d. | 56.23±0.25 | d.l.d. |
| 14.1a18.1 | 3.29±1.03 | 15.52±0.62 | 32.98±0.38 | d.l.d. | 59.07±0.20 | d.l.d. |
| 18.1a22.1 | 2.69±1.34 | 16.85±1.09 | 28.17±0.37 | d.l.d. | 56.02±0.32 | d.l.d. |
| 22.1a28 | 0.35±0.74 | 17.50±0.89 | 16.76±0.47 | d.l.d. | 58.97±0.20 | d.l.d. |
| 28a32 | 0.35±1.16 | 15.06±0.83 | 30.99±0.34 | d.l.d. | 48.30±0.23 | d.l.d. |
| 32a38 | 1.90±1.99 | 14.85±0.62 | 31.14±0.36 | d.l.d. | 56.62±0.11 | d.l.d. |

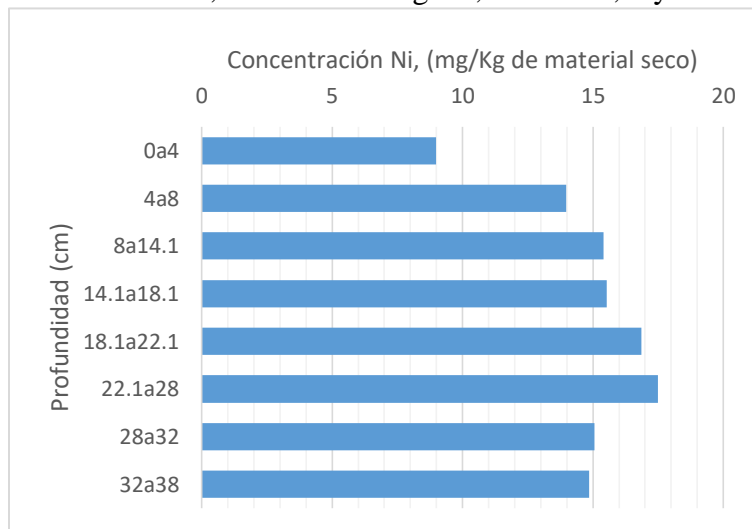
Fuente: datos experimentales, Departamento de Análisis Inorgánico; d.l.d.: debajo límite de detección.

Gráfica No.12. Concentraciones de plomo en las distintas secciones del núcleo II, Las Cristalinas, San Juan la Laguna, estratos 1, 2 y 3.



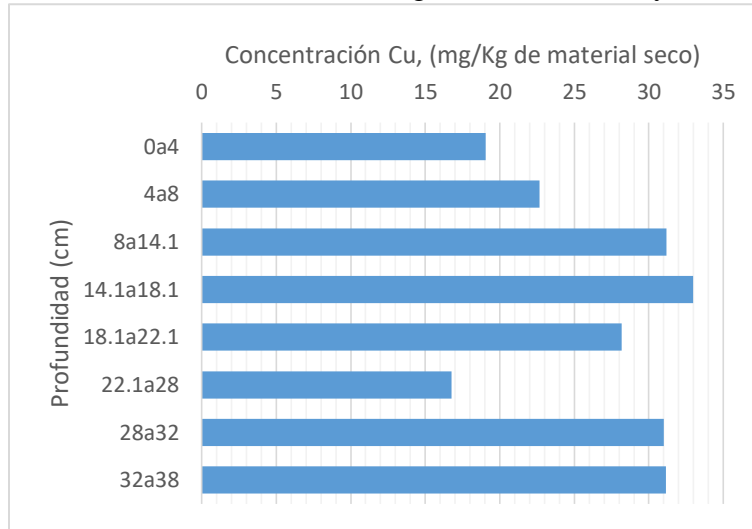
Fuente: tabla No. 14.

Gráfica No.13. Concentraciones de níquel en las distintas secciones del núcleo II, Las Cristalinas, San Juan la Laguna, estratos 1, 2 y 3.



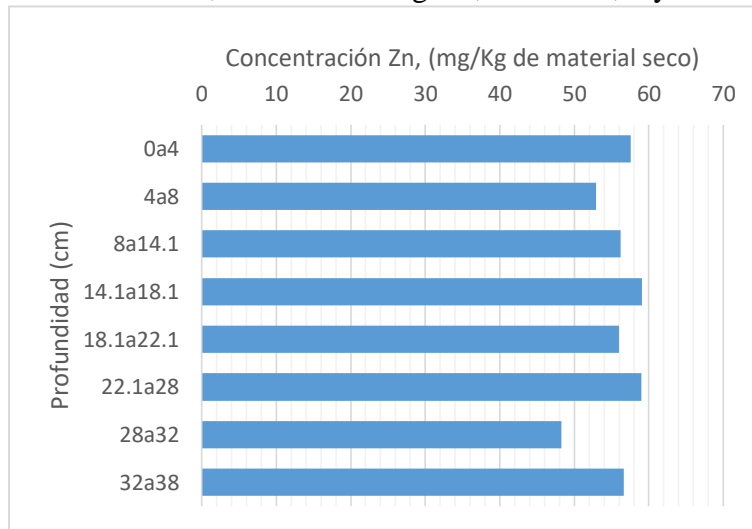
Fuente: tabla No. 14.

Gráfica No.14. Concentraciones de cobre en las distintas secciones del núcleo II, Las Cristalinas, San Juan la Laguna, estratos 1, 2 y 3.



Fuente: tabla No. 14.

Gráfica No.15. Concentraciones de zinc en las distintas secciones del núcleo II, Las Cristalinas, San Juan la Laguna, estratos 1, 2 y 3.



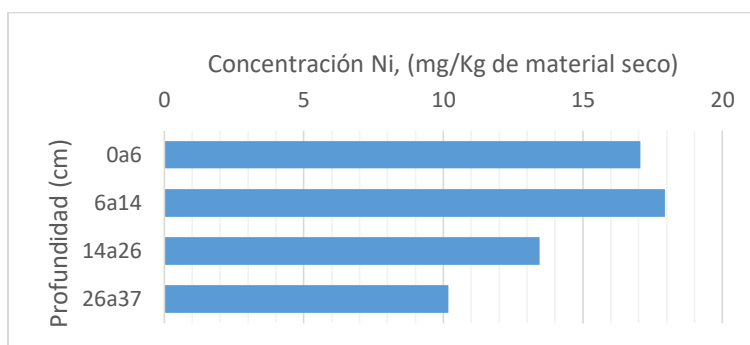
Fuente: tabla No. 14.

Tabla No. 15. Cuadro resumen de concentraciones de metales (mg/Kg de material seco) en secciones del núcleo I, Santiago Atitlán.

| Profundidad (cm) | Plomo | Níquel | Cobre | Cromo | Zinc | Cadmio |
|------------------|-----------|------------|------------|--------|------------|--------|
| 0a6 | 2.56±1.32 | 17.07±0.71 | 30.53±0.10 | d.l.d. | 38.35±0.19 | d.l.d. |
| 6a14 | d.l.d. | 17.94±0.26 | 30.41±0.61 | d.l.d. | 36.21±0.12 | d.l.d. |
| 14a26 | d.l.d. | 13.45±0.47 | 14.14±0.79 | d.l.d. | 25.70±0.22 | d.l.d. |
| 26a37 | d.l.d. | 10.19±0.46 | 10.34±0.35 | d.l.d. | 14.22±0.42 | d.l.d. |

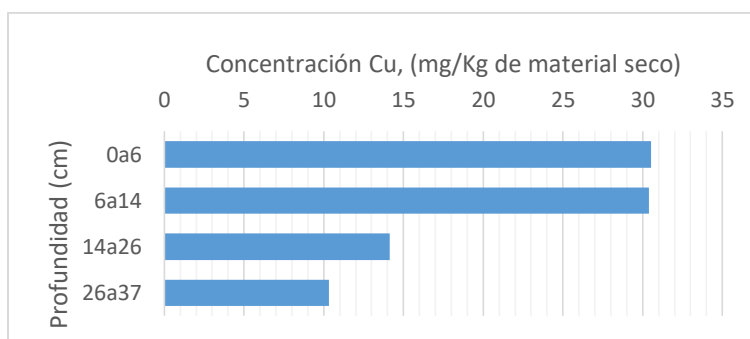
Fuente: datos experimentales, Departamento de Análisis Inorgánico; d.l.d.: debajo del límite de detección.

Gráfica No.16. Concentraciones de níquel en las distintas secciones del núcleo I, Santiago Atitlán.



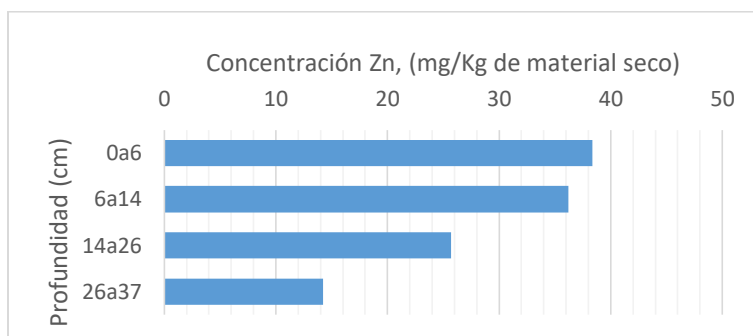
Fuente: tabla No. 15.

Gráfica No.17. Concentraciones de cobre en las distintas secciones del núcleo I, Santiago Atitlán.



Fuente: tabla No. 15.

Gráfica No. 18. Concentraciones de zinc en las distintas secciones del núcleo I, Santiago Atitlán.



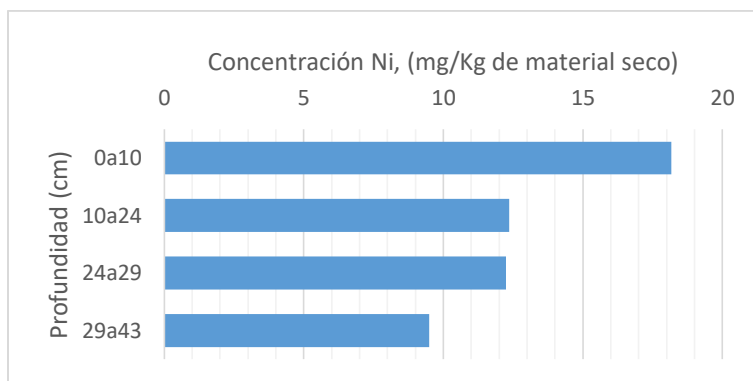
Fuente: tabla No. 15.

Tabla No. 16. Cuadro resumen de concentraciones de metales (mg/Kg de material seco) en secciones del núcleo II, Santiago Atitlán.

| Profundidad (cm) | Plomo | Níquel | Cobre | Cromo | Zinc | Cadmio |
|------------------|-----------|------------|------------|--------|------------|--------|
| 0a10 | 0.76±1.15 | 18.18±0.66 | 21.20±0.73 | d.l.d. | 33.26±0.41 | d.l.d. |
| 10a24 | d.l.d. | 12.36±0.69 | 17.67±0.31 | d.l.d. | 25.71±0.16 | d.l.d. |
| 24a29 | d.l.d. | 12.24±0.80 | 7.61±0.50 | d.l.d. | 13.47±0.46 | d.l.d. |
| 29a43 | d.l.d. | 9.50±0.94 | 7.67±0.38 | d.l.d. | 12.32±0.25 | d.l.d. |

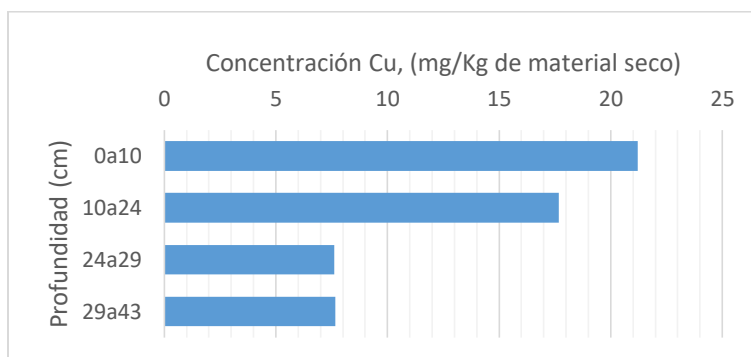
Fuente: datos experimentales, Departamento de Análisis Inorgánico; d.l.d.: debajo del límite de detección.

Gráfica No.19. Concentraciones de níquel en las distintas secciones del núcleo II, Santiago Atitlán.



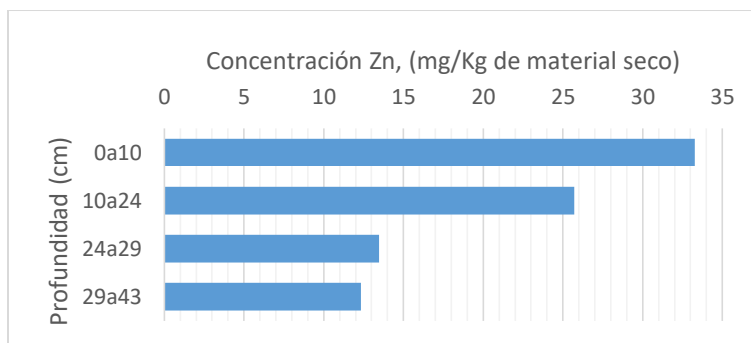
Fuente: tabla No. 16.

Gráfica No.20. Concentraciones de cobre en las distintas secciones del núcleo II, Santiago Atitlán.



Fuente: tabla No. 16.

Gráfica No.21. Concentraciones de zinc en las distintas secciones del núcleo II, Santiago Atitlán.



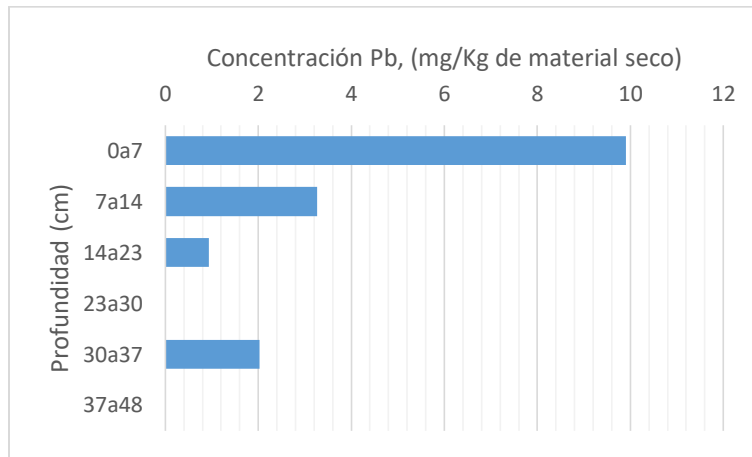
Fuente: tabla No. 16.

Tabla No. 17. Cuadro resumen de concentraciones de metales (mg/Kg de material seco) en secciones del núcleo III, Santiago Atitlán.

| Profundidad (cm) | Plomo | Níquel | Cobre | Cromo | Zinc | Cadmio |
|------------------|-----------|------------|------------|--------|-------------|--------|
| 0a7 | 9.90±1.31 | 14.81±0.67 | 46.09±0.78 | d.l.d. | 189.58±0.72 | d.l.d. |
| 7a14 | 3.27±1.36 | 12.52±0.37 | 37.14±0.59 | d.l.d. | 123.86±0.30 | d.l.d. |
| 14a23 | 0.94±1.21 | 10.57±0.71 | 24.80±0.28 | d.l.d. | 27.99±0.26 | d.l.d. |
| 23a30 | d.l.d. | 13.34±5.13 | 20.13±0.46 | d.l.d. | 22.13±0.19 | d.l.d. |
| 30a37 | 2.03±1.34 | 08.14±0.49 | 8.35±0.32 | d.l.d. | 13.30±0.17 | d.l.d. |
| 37a48 | d.l.d. | 09.53±0.52 | 35.41±0.69 | d.l.d. | 43.08±0.31 | d.l.d. |

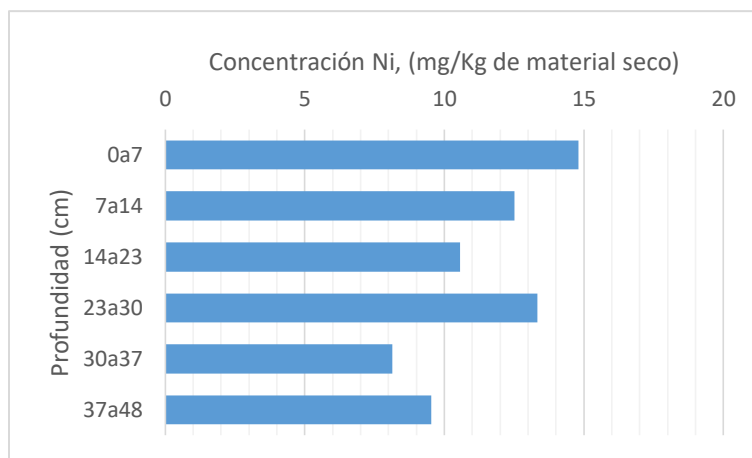
Fuente: datos experimentales, Departamento de Análisis Inorgánico; d.l.d.: debajo del límite de detección.

Gráfica No.22. Concentraciones de plomo en las distintas secciones del núcleo III, Santiago Atitlán.



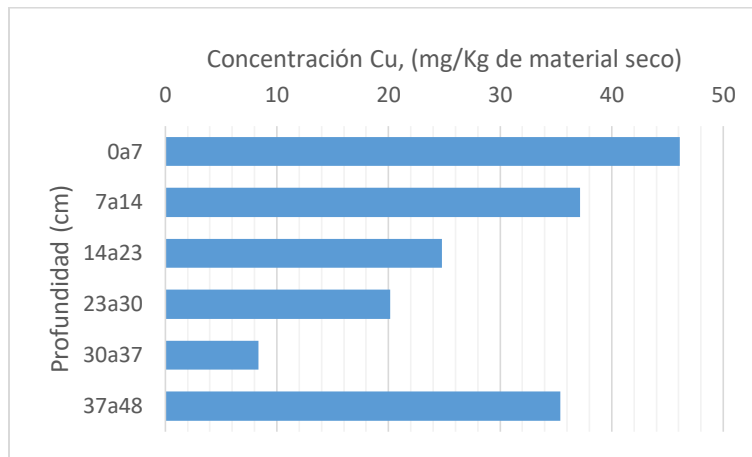
Fuente: tabla No. 17.

Gráfica No.23. Concentraciones de níquel en las distintas secciones del núcleo III, Santiago Atitlán.



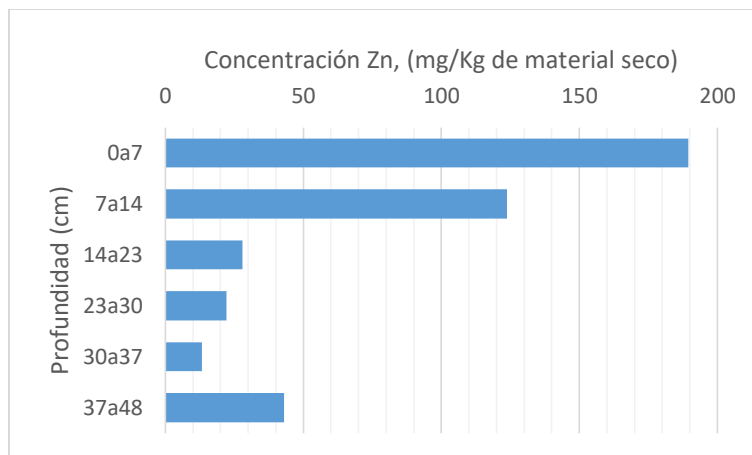
Fuente: tabla No. 17.

Gráfica No.24. Concentraciones de cobre en las distintas secciones del núcleo III, Santiago Atitlán.



Fuente: tabla No. 17.

Gráfica No.25. Concentraciones de zinc en las distintas secciones del núcleo III, Santiago Atitlán.



Fuente: tabla No. 17.

Pruebas de t de Student para la determinación de tendencia de los metales analizados en los núcleos de sedimentos. El análisis no se aplicó para el elemento cadmio debido a que este no se detectó en ninguna de las secciones de los núcleos analizados.

Tabla No. 18. Determinación estadística de la tendencia de los metales analizados en el núcleo I, Las Cristalinas, San Juan la Laguna.

| Profundidad/ t de Student | Plomo | Níquel | Cromo | Cobre | Zinc |
|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 3 | d.l.d. | 4.748 | 4.284 | 14.872 | 50.780 |
| 6 | d.l.d. | 7.030 | 4.711 | 16.897 | 51.837 |
| 9 | d.l.d. | 6.060 | 4.006 | 17.308 | 47.975 |
| 12 | d.l.d. | 5.361 | 3.946 | 21.278 | 49.694 |
| 15 | d.l.d. | 5.352 | 1.816 | 26.369 | 50.220 |
| 18 | d.l.d. | 4.304 | 1.236 | 26.937 | 46.651 |
| 21 | 3.236 | 4.825 | 0.234 | 27.340 | 48.542 |
| 24 | 2.294 | 4.523 | 0.753 | 27.793 | 50.603 |
| 27 | 2.194 | 4.452 | d.l.d. | 27.855 | 51.509 |
| 30 | 0.708 | 4.577 | d.l.d. | 28.684 | 52.162 |
| 34.5 | 4.280 | d.l.c. | d.l.d. | 31.555 | 69.404 |
| coeficiente de correlación | 0.148 | -0.640 | -0.935 | 0.938 | 0.551 |
| t de prueba | 0.259 | -2.496 | -7.887 | 8.138 | 1.981 |
| t critico al 95% de confianza | 3.182 | 2.306 | 2.447 | 2.262 | 2.262 |
| Tendencia significativa | NO | SI | SI | SI | NO |

Fuente: Datos experimentales, hojas de cálculo de Excel y tablas de t de student. d.l.d.: debajo del límite de detección, d.l.c.: debajo del límite de cuantificación

Tabla No. 19. Determinación estadística de la tendencia de los metales analizados en el núcleo II, Las Cristalinas, San Juan la Laguna.

| Profundidad/ t de Student | Plomo | Níquel | Cromo | Cobre | Zinc |
|---------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|
| 4 | 1.088 | 8.993 | d.l.d. | 19.050 | 57.588 |
| 8 | 2.143 | 13.981 | d.l.d. | 22.658 | 52.918 |
| 14.1 | 3.310 | 15.397 | d.l.d. | 31.169 | 56.230 |
| 18.1 | 3.289 | 15.516 | 0.664 | 32.980 | 59.070 |
| 22.1 | 2.695 | 16.845 | d.l.d. | 28.175 | 56.023 |
| 28 | 0.351 | 17.497 | d.l.d. | 16.760 | 58.972 |
| 32 | 0.345 | 15.056 | d.l.d. | 30.989 | 48.301 |
| 38 | 1.901 | 14.847 | d.l.d. | 31.141 | 56.619 |

| | | | | | |
|-------------------------------|--------|-------|------|-------|--------|
| coeficiente de correlación | -0.305 | 0.599 | n.a. | 0.365 | -0.176 |
| t de prueba | -0.716 | 1.833 | n.a. | 0.959 | -0.437 |
| t crítico al 95% de confianza | 2.447 | 2.447 | n.a. | 2.447 | 2.447 |
| Tendencia significativa | NO | NO | n.a. | NO | NO |

Fuente: Datos experimentales, hojas de cálculo de Excel y tablas de t de student. d.l.d.: debajo del límite de detección

Tabla No. 20. Determinación estadística de la tendencia de los metales analizados en el núcleo I, Santiago Atitlán.

| Profundidad/ t de Student | Plomo | Níquel | Cromo | Cobre | Zinc |
|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 6 | d.l.d. | 17.067 | d.l.d. | 30.525 | 38.353 |
| 14 | d.l.d. | 17.944 | d.l.d. | 30.408 | 36.205 |
| 26 | d.l.d. | 13.449 | d.l.d. | 14.137 | 25.701 |
| 37 | d.l.d. | 10.192 | d.l.d. | 10.340 | 14.219 |
| coeficiente de correlación | n.a. | -0.941 | n.a. | -0.952 | -0.983 |
| t de prueba | n.a. | -3.930 | n.a. | -4.412 | -7.497 |
| t crítico al 95% de confianza | n.a. | 4.303 | n.a. | 4.303 | 4.303 |
| Tendencia significativa | n.a. | NO | n.a. | SI | SI |

Fuente: Datos experimentales, hojas de cálculo de Excel y tablas de t de student. n.a.: no aplica, d.l.d.: debajo del límite de detección

Tabla No. 21. Determinación estadística de la tendencia de los metales analizados en el núcleo II, Santiago Atitlán.

| Profundidad/ t de Student | Plomo | Níquel | Cromo | Cobre | Zinc |
|---------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 10 | 0.757 | 18.182 | d.l.d. | 21.203 | 33.255 |
| 24 | d.l.d. | 12.357 | d.l.d. | 17.672 | 25.712 |
| 29 | d.l.d. | 12.240 | d.l.d. | 7.608 | 13.473 |
| 43 | d.l.d. | 9.495 | d.l.d. | 7.667 | 12.319 |

| | | | | | |
|-------------------------------|------|--------|------|--------|--------|
| coeficiente de correlación | n.a. | -0.961 | n.a. | -0.873 | -0.913 |
| t de prueba | n.a. | -4.907 | n.a. | -2.531 | -3.174 |
| t crítico al 95% de confianza | n.a. | 4.303 | n.a. | 4.303 | 4.303 |
| Tendencia significativa | n.a. | SI | n.a. | NO | NO |

Fuente: Datos experimentales, hojas de cálculo de Excel y tablas de t de student. n.a.: no aplica, d.l.d.: debajo del límite de detección

Tabla No. 22. Determinación estadística de la tendencia de los metales analizados en el núcleo III, Santiago Atitlán.

| Profundidad/ t de Student | Plomo | Níquel | Cromo | Cobre | Zinc |
|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|---------|
| 7 | 9.897 | 14.812 | d.l.d. | 46.089 | 189.579 |
| 14 | 3.269 | 12.518 | d.l.d. | 37.140 | 123.859 |
| 23 | 0.944 | 10.569 | d.l.d. | 24.796 | 27.992 |
| 30 | d.l.d. | 13.345 | d.l.d. | 20.130 | 22.125 |
| 37 | 2.034 | 8.139 | d.l.d. | 8.355 | 13.299 |
| 48 | d.l.d. | 9.533 | d.l.d. | 35.414 | 43.077 |
| coeficiente de correlación | -0.736 | -0.769 | n.a. | -0.519 | -0.786 |
| t de prueba | -1.882 | -2.406 | n.a. | -1.214 | -2.542 |
| t crítico al 95% de confianza | 4.303 | 2.776 | n.a. | 2.776 | 2.776 |
| Tendencia significativa | NO | NO | n.a. | NO | NO |

Fuente: Datos experimentales, hojas de cálculo de Excel y tablas de t de student. n.a.: no aplica, d.l.d.: debajo del límite de detección

X. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los núcleos denominados Las Cristalinas (I y II) corresponden a dos muestras colectadas en un área del Lago de Atitlán cercana a la playa Las Cristalinas, ubicada en el municipio de San Juan la Laguna, en el lado Oeste del lago. El núcleo I de Las Cristalinas se seccionó a cada 3 cm sin distinción de estratos y en el segundo se diferenciaron 3 estratos y cada estrato se seccionó aproximadamente cada 4 cm.

En las tablas No.13 y 14, se observa que para todas las secciones analizadas, el cadmio no fue detectable. Es decir que este metal no se encuentra históricamente en el lago en cantidades medibles por medio de los métodos aplicados en esta investigación.

Para los metales detectados en las muestras, según se observa en la gráfica No.7, en el núcleo denominado Núcleo I, Las Cristalinas (NILC) el máximo valor para plomo se registra en la sección más profunda. Es posible que este resultado corresponda a la máxima contribución natural de las rocas que forman el basamento del lago en este punto, así como a la mayor mineralización y acumulación de las contribuciones antropogénicas históricas. En las secciones más profundas del núcleo de sedimentos, se observan concentraciones crecientes de plomo conforme se asciende en la columna, hasta la sección de 18 a 21 cm, lo cual es consistente con una mayor contribución antropogénica. Sin embargo, en secciones más recientes este metal ya no es detectable. Esta observación parece corresponderse con la implementación de medidas ambientales a nivel mundial para la reducción de las emisiones de plomo que pudieron tener efecto visible a nivel local. En particular cabe resaltar la eliminación de los aditivos de plomo en combustibles en Guatemala a partir de la década de 1990.

En el núcleo denominado: Núcleo II, Las Cristalinas (NIILC) el estrato más profundo presenta una concentración de plomo mayor a la de la sección adyacente, posiblemente por las mismas razones expuestas en el caso del núcleo anterior (NILC). En las secciones más profundas se observan las menores concentraciones, que aumentan hasta llegar a un

máximo en la sección de 8 a 14.1 cm y luego disminuyen en las secciones más recientes, lo cual coincide con la interpretación del núcleo anterior respecto a que la columna de sedimentos registra una creciente contaminación por actividades antropogénicas, seguida de una reducción derivada de la implementación de políticas para mejoramiento ambiental. Estos resultados evidencian que la aplicación de políticas y prácticas de manejo dirigidas a problemáticas identificadas ha sido exitosa en la prevención de la contaminación por plomo en el pasado, demostrando su potencial utilidad en el futuro.

El níquel muestra en NILC una tendencia general a tener una mayor concentración conforme más superficiales son las secciones de sedimentos analizadas, existiendo una correlación estadísticamente significativa entre la profundidad máxima de cada estrato y la concentración de este metal en el mismo, lo cual sugiere un aumento en el tiempo de la contribución antropogénica (Tabla No.18) En la muestra NIILC se encontraron concentraciones mayores de este metal que en NILC y el comportamiento sigue una curva con su máximo en la sección de 22.1 a 28 cm de profundidad, sin que se evidencie una correlación entre las variables indicadas.

El cromo en las secciones de la muestra NILC también aumenta en general su concentración conforme más recientes son las secciones del núcleo de sedimento, como se corrobora al haber encontrado correlación entre la profundidad del estrato y su concentración para este elemento (Tabla No.18). En la muestra NIILC los resultados son muy variables (Tabla No.19), con secciones de valores no detectables y un pico pronunciado en la sección de 8 a 14.1 cm de profundidad, además de que no se encontró una correlación estadísticamente significativa entre profundidad y concentración de cromo.

En el caso del cobre, la muestra de NILC presenta un comportamiento contrario al esperado de acuerdo con la hipótesis inicial. Como se aprecia en la gráfica No.10, las concentraciones de este metal disminuyen conforme más recientes son las secciones de sedimento analizadas, existiendo una correlación estadísticamente significativa entre la profundidad máxima de cada estrato y su concentración de cobre, según se observa en tabla

No. 18. En la muestra NIILC se observan valores muy similares en las dos secciones del estrato profundo, mientras que para el resto de estratos en las secciones más profundas se observan las menores concentraciones, que aumentan hasta llegar a un máximo en la sección de 14.1 a 18.1 cm y luego disminuyen en las secciones más recientes de sedimento.

El zinc no presenta tendencias evidentes en ninguna de las dos muestras del área Oeste del Lago y no se encontró correlación estadística entre la profundidad de las secciones y sus concentraciones de este metal (Tablas No.18 y No.19). Los resultados de la muestra NIILC están dispersos alrededor de aproximadamente 54.5 mg/Kg, siendo éste el metal de mayor concentración entre los analizados, para todas las secciones y núcleos. Los resultados de NILC muestran fluctuaciones que parecen seguir patrones cíclicos, pero no se puede descartar que dicho arreglo sea aleatorio.

Para todos los metales detectados en NILC la sección más superficial presenta una menor concentración que la sección adyacente, posiblemente debido a la mayor contribución de materia orgánica reciente, que provoca un efecto de dilución de los demás componentes. Este efecto también es perceptible para la mayoría de los metales en la muestra NIILC, a excepción del zinc.

Por otra parte, los núcleos identificados como Santiago Atitlán I, II y III (NISA, NIISA y NIISA) corresponden a tres muestras colectadas en la bahía de Santiago Atitlán ubicada al sur del lago, entre los volcanes San Pedro y Atitlán. El seccionamiento de los núcleos se realizó a cada estrato diferenciado por cambios en la tonalidad de color.

En las tablas No. 14, 15 y 16, se observa que para las muestras de Santiago Atitlán, además del cadmio, el cromo tampoco fue detectado en ninguna de las secciones analizadas. Es decir que esta parte del lago no se ha visto contaminada históricamente por estos metales en cantidades medibles por medio de los métodos aplicados en esta investigación.

En los núcleos I y II de Santiago Atitlán el plomo únicamente fue detectable en el estrato más superficial, mientras que en el núcleo III el estrato más reciente es también el que presenta la mayor concentración, pero los resultados globales no muestran una correlación estadísticamente significativa entre la profundidad máxima de cada estrato y la concentración de plomo (Tablas No.20, No.21 y No.22). Llama la atención la gran dispersión de los datos obtenidos, que indica condiciones muy diferentes en cada uno de los períodos a los que corresponden los estratos analizados, también podrían haber perturbaciones o mezcla ocasionadas por deslaves en las faldas de los volcanes.

Para el níquel en las tres muestras del área de Santiago Atitlán se observa que las secciones más profundas presentan las menores concentraciones y en general hay un aumento de dichos valores conforme las secciones analizadas se ubican más cerca de la superficie. Sin embargo sólo se encontró correlación estadísticamente significativa al respecto en los sedimentos de NIISA (Tablas No.20, No.21 y No.22). Por otra parte, resalta que en el núcleo III se encontró un mayor valor de concentración en el estrato más profundo que en el adyacente.

El cobre muestra un comportamiento similar al del níquel en las muestras de Santiago Atitlán. Se ve la tendencia general al alza de las concentraciones en el registro histórico de los sedimentos para los núcleos I, II y III, aunque la correlación entre profundidad y concentración sólo es estadísticamente significativa para el NIISA. En el caso de la muestra de sedimentos de NIISA, la correlación se hace estadísticamente significativa (Tabla No.22), cuando no se considera el estrato más profundo, que presenta un alto valor de concentración, ya sea por una mayor contribución natural de la roca o una máxima mineralización y acumulación de las contribuciones antropogénicas históricas.

Los resultados de zinc en las muestras de Santiago Atitlán muestran un comportamiento análogo al observado para cobre, para cada uno de los tres núcleos de sedimentos analizados.

Para casi todos los elementos detectables en el área de Santiago Atitlán, con excepción del níquel, llama la atención que las concentraciones son mayores en el núcleo III que en el I y las de éste son mayores a las del núcleo II, podría ser por diferencias en el relieve del fondo del lago. Por otra parte, dado que el núcleo III es el que alcanzó mayor profundidad es el único en el cual se observa el fenómeno de acumulación de metales en el estrato más profundo.

XI. CONCLUSIONES

- a) El cadmio no fue detectado en ninguna de las secciones analizadas de los cinco núcleos de sedimentos, límite de detección de cadmio: 0.11 mg/Kg, por lo tanto no deben de haber fuentes significativas de contaminación por cadmio en los alrededores de los sitios de colecta de los núcleos.
- b) De manera general se observa una disminución de plomo en las secciones más superiores en dos núcleos de sedimentos (NILC y NIILC) colectados en San Juan la Laguna.
- c) Los núcleos colectados en Las Cristalinas, San Juan la Laguna, están contaminados con cromo y éste tiene tendencia a ir aumentando su concentración con el paso del tiempo.
- d) En los núcleos NILC y NIILC la concentración de cobre aumenta en relación a la profundidad.
- e) Las concentraciones de zinc en las secciones de los núcleos NILC y NIILC no presentan tendencia.
- f) El plomo sólo se detectó en las secciones superiores de los tres núcleos de Santiago Atitlán, lo que indica contaminación reciente por plomo en dicho lugar.
- g) Las concentraciones de níquel, cobre y zinc aumentan hacia las secciones superiores (recientes) en las columnas de Santiago Atitlán.
- h) El análisis de los núcleos de sedimentos permiten visualizar cambios en la contaminación del lago por metales, como se constató en los núcleos: NILC con presencia creciente de cromo, níquel y cobre; plomo y zinc en todos los núcleos sin tendencia; cobre y níquel en todos los núcleos con tendencia al aumento.

XII. RECOMENDACIONES

- 1) Realizar muestreos periódicos del estrato superior anualmente en el área de Santiago Atitlán para poder determinar si el plomo presente posee una tendencia al aumento o fue una contaminación eventual.
- 2) Ampliar el rango de metales analizados con el objetivo de establecer la composición química exacta de los núcleos de sedimentos, en vista de que en el agua del lago se han detectado niveles de mercurio y arsénico superiores a los límites recomendables por la norma COGUANOR 29001:99.
- 3) Datar cada sección de los núcleos para poder vincular los resultados obtenidos con la época correspondiente.
- 4) Colectar núcleos de sedimentos de mayor longitud (superiores a los 60 cm), con el fin de obtener un mayor perfil de la columna de sedimentos.
- 5) Aumentar el número de sitios de muestreo con el fin de obtener mayores datos para comparar, tratando de incluir el centro del lago, donde se encuentra la mayor profundidad del lago de Atitlán.

XIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguilar Romo, M. (2001). Análisis de agua determinación de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas método de prueba (cancela a la nmx-aa-051-1981): CONAGUA. México.

Bejerman, J. (2009) Symposium on applied geology held in Mar del Plata, Geoindicadores: Lista de Chequeo, International Union of Geological Sciences. Argentina

Berger, A.R., Iams, W. J. (1996). Geoindicators: Assessing Rapid Environmental Changes in Earth Systems. Rotterdam.

Castellanos, E., Girón de Masaya, N., Álvarez, de Mejía, M., López, M., España, M. (2002). Calidad de Agua del Lago de Atitlán, Universidad del Valle de Guatemala - UVG-, Asociación Vivamos Mejor, Consejo Nacional de Áreas Protegidas -CONAP-, The Nature Conservancy -TNC-, Guatemala.

Castro, M., Méndez M. (2008). Heavy metals: Implications associated to fish consumption. *Environmental Toxicology and Pharmacology* 26 (2008) 263–271.

Charles, D. F. & Smol J. P. (1994). Long-term chemical changes in lakes: quantitative inferences from biotic remains in the sediment record. In Baker. *Environmental chemistry of lakes and reservoirs*. Advances in Chemistry Series 237, Washington DC: American Chemical Society.

CONAP. (2006). Plan de Desarrollo Sostenible de la Reserva de Uso Múltiple de la Cuenca del Lago de Atitlán y del Departamento de Sololá 2006-2010. CONAP, Guatemala.

CONAP. (2007). Plan Maestro de la Reserva De Uso Múltiple Cuenca del Lago de Atitlán 2007-2011. Consejo Nacional de Áreas Protegidas. Guatemala.

Emsley, John. (2002) *Nature's Building Blocks, an A-Z Guide to the Elements*. Oxford University press, United State of America.

Esteves, F.A. (1988) *Fundamentos de Limnología*. São Paulo.

Fernandes, C., Fontainhas A., Cabral D., Salgado M. (2008) Heavy metals in water, sediment and tissues of *Liza saliens* from Esmoriz-Paramos lagoon, Portugal. *Environmental Monitoring Assessment* 136:267–275. DOI 10.1007/s10661-007-9682-6.

Gibbs, R. J. (1994). Metals in the sediments along the Hudson river estuary. *Environment International*, Vol. 20, No. 4, pp. 507-516. Pergamon.

Greenwood, N., Earnshaw A. (1997). *Chemistry of the Elements*, 2nd ed, reprinted 2005, Butterworth-Heinemann, India.

La Bastille, A. (1988). *Lago de Atitlán*. West of the Wind Publications. Nueva York.

Monroy, M., Maceda A., de Sostoa A. (2014). Metal concentration in water, sediment and four fish species from Lake Titicaca reveals a large-scale environmental concern. *Science of the Total Environment*, 233–244.

Oliva, B.; Pérez, J.F., del Cid; M., Martínez, F. J., y Valladares, B. (2009). Estudio de contaminantes ecotóxicos en agua y organismos acuáticos del Lago de Atitlán, INF-2009-064, Dirección General de Investigación de la Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.

Oliva, B., Pérez, J.F., Valladares, B. 2011. Evaluación de la eutrofización en los lagos Atitlán y Petén Itzá de Guatemala. XIII Congresso Brasileiro de Limnologia. Natal, septiembre de 2011.

Páez F., Mee, L. (1984) Anales del instituto de ciencias del mar y limnología, modificación a un nucleador ligero y económico para muestrear sedimentos sin disturbarlos, UNAM, México.

Pérez, J. F., Valladares, B., Hernández E., Oliva B., del Cid M., Jayes P. (2015). Determinación de arsénico y mercurio en agua superficial del Lago de Atitlán. Dirección General de Investigación. Universidad de San Carlos de Guatemala Ciencia, Tecnología y Salud. Vol. 2 Número 2 2015. ISSN: 2409-3459

Rejmankova, Eliska, Komarek Jiri, Dix Margaret, Komarkova Jaroslava, Giron Nancy. (2010). Cyanobacterial blooms in Lake Atitlan, Guatemala. *Limnologica* 41 (2011) 296–302.

Ruiz, A.; Axpuaca, E. (2014) Determinación de metabolitos secundarios y cianotoxinas producidos por la cianobacteria *Lyngbya sp.* Y su relación con la calidad del agua del Lago de Atitlán, Seminario de Investigación, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.

Simmons, C.; Tarano J. y Pinto, J.; (1959). Clasificación de reconocimiento de los suelos de la República de Guatemala. Editorial Ibarra. Guatemala.

Smol, J. P. (1995). Paleolimnological approaches to the evaluation and monitoring of ecosystem health: providing a history for environmental damage and recovery. In Rapport, D. J., C. L. Gaudet & P. Calow *Evaluating and monitoring the health of large-scale ecosystems*: 301-318. Berlin: Springer-Verlag.

UVG, TNC, CONAP. Asociación Patronato Vivamos Mejor, ARNP (2003) Diagnóstico Ecológico-social en la cuenca de Atitlán. Ediciones Superiores S.A. Guatemala.

Vicente, J., Galindo, M., Garcia, M., Granado, M. (2009) Bioavailability of heavy metals monitoring water, sediments and fish species from a polluted estuary. *Journal of Hazardous Materials* 162 823–836. Elsevier

Webster, J.G., Webster, K.S. (2007). Trace metals in cyanobacterial mats, phytoplankton and sediments of the Lake Vanda region, Antarctica. *Antarctic Science* 19 (3), 311–319. DOI: 10.1017/S0954102007000417. New Zealand.

Wright, John. (2003). *Environmental Chemistry*, Routledge introductions to environment, Routledge Taylor & Francis Group, London & New York.

XIV. ANEXOS

Codificación de las muestras:

Tabla No. 23. Seccionamiento y peso por sección de los núcleos de sedimentos de Las Cristalinas, San Juan la Laguna.


| Descripción | Profundidad (cm) | Código | Peso (g) |
|--|------------------|--------|----------|
| Núcleo I, Las Cristalinas, San Juan la Laguna | 0a3 | M01 | 0.2170 |
| Núcleo I, Las Cristalinas, San Juan la Laguna | 0a3 | M02 | 0.2181 |
| Núcleo I, Las Cristalinas, San Juan la Laguna | 3a6 | M03 | 0.2117 |
| Núcleo I, Las Cristalinas, San Juan la Laguna | 3a6 | M04 | 0.2169 |
| Núcleo I, Las Cristalinas, San Juan la Laguna | 6a9 | M05 | 0.2171 |
| Núcleo I, Las Cristalinas, San Juan la Laguna | 6a9 | M06 | 0.2110 |
| Núcleo I, Las Cristalinas, San Juan la Laguna | 09a12 | M07 | 0.2170 |
| Núcleo I, Las Cristalinas, San Juan la Laguna | 09a12 | M08 | 0.2127 |
| Núcleo I, Las Cristalinas, San Juan la Laguna | 12a15 | M09 | 0.2188 |
| Núcleo I, Las Cristalinas, San Juan la Laguna | 12a15 | M10 | 0.2161 |
| Núcleo I, Las Cristalinas, San Juan la Laguna | 15a18 | M11 | 0.2130 |
| Núcleo I, Las Cristalinas, San Juan la Laguna | 15a18 | M12 | 0.2161 |
| Núcleo I, Las Cristalinas, San Juan la Laguna | 18a21 | M13 | 0.2132 |
| Núcleo I, Las Cristalinas, San Juan la Laguna | 18a21 | M14 | 0.2129 |
| Núcleo I, Las Cristalinas, San Juan la Laguna | 21a24 | M15 | 0.2112 |
| Núcleo I, Las Cristalinas, San Juan la Laguna | 21a24 | M16 | 0.2130 |
| Núcleo I, Las Cristalinas, San Juan la Laguna | 24a27 | M17 | 0.2163 |
| Núcleo I, Las Cristalinas, San Juan la Laguna | 24a27 | M18 | 0.2132 |
| Núcleo I, Las Cristalinas, San Juan la Laguna | 27a30 | M19 | 0.2170 |
| Núcleo I, Las Cristalinas, San Juan la Laguna | 27a30 | M20 | 0.2159 |
| Núcleo I, Las Cristalinas, San Juan la Laguna | 30a34.5 | M21 | 0.2127 |
| Núcleo I, Las Cristalinas, San Juan la Laguna | 30a34.5 | M22 | 0.2152 |
| Núcleo II, Las Cristalinas San Juan la Laguna, estrato 1 | 0a4 | M23 | 0.2166 |
| Núcleo II, Las Cristalinas San Juan la Laguna, estrato 1 | 0a4 | M24 | 0.2172 |
| Núcleo II, Las Cristalinas San Juan la Laguna, estrato 1 | 4a8 | M25 | 0.2164 |

| | | | |
|--|-----------|-----|--------|
| Núcleo II, Las Cristalinas San Juan la Laguna, estrato 1 | 4a8 | M26 | 0.2160 |
| Núcleo II, Las Cristalinas San Juan la Laguna, estrato 1 | 8a14.1 | M27 | 0.2181 |
| Núcleo II, Las Cristalinas San Juan la Laguna, estrato 1 | 8a14.1 | M28 | 0.2160 |
| Núcleo II, Las Cristalinas San Juan la Laguna, estrato 2 | 14.1a18.8 | M29 | 0.2155 |
| Núcleo II, Las Cristalinas San Juan la Laguna, estrato 2 | 14.1a18.8 | M30 | 0.2152 |
| Núcleo II, Las Cristalinas San Juan la Laguna, estrato 2 | 18.1a22.1 | M31 | 0.2143 |
| Núcleo II, Las Cristalinas San Juan la Laguna, estrato 2 | 18.1a22.1 | M32 | 0.2177 |
| Núcleo II, Las Cristalinas San Juan la Laguna, estrato 2 | 22.1a28 | M33 | 0.2144 |
| Núcleo II, Las Cristalinas San Juan la Laguna, estrato 2 | 22.1a28 | M34 | 0.2191 |
| Núcleo II, Las Cristalinas San Juan la Laguna, estrato 3 | 28a32 | M35 | 0.2170 |
| Núcleo II, Las Cristalinas San Juan la Laguna, estrato 3 | 28a32 | M36 | 0.2146 |
| Núcleo II, Las Cristalinas San Juan la Laguna, estrato 3 | 32a38 | M37 | 0.2162 |
| Núcleo II, Las Cristalinas San Juan la Laguna, estrato 3 | 32a38 | M38 | 0.2187 |
| Núcleo III, Santiago Atitlán | 0a7 | M39 | 0.2163 |
| Núcleo III, Santiago Atitlán | 0a7 | M40 | 0.2147 |
| Núcleo III, Santiago Atitlán | 7a14 | M41 | 0.2164 |
| Núcleo III, Santiago Atitlán | 7a14 | M42 | 0.2182 |
| Núcleo III, Santiago Atitlán | 14a23 | M43 | 0.2137 |
| Núcleo III, Santiago Atitlán | 14a23 | M44 | 0.2111 |
| Núcleo III, Santiago Atitlán | 23a30 | M45 | 0.2123 |
| Núcleo III, Santiago Atitlán | 23a30 | M46 | 0.2177 |
| Núcleo III, Santiago Atitlán | 30a37 | M47 | 0.2150 |
| Núcleo III, Santiago Atitlán | 30a37 | M48 | 0.2112 |
| Núcleo III, Santiago Atitlán | 37a48 | M49 | 0.2164 |
| Núcleo III, Santiago Atitlán | 37a48 | M50 | 0.2170 |
| Núcleo I, Santiago Atitlán | 0a6 | M51 | 0.2117 |
| Núcleo I, Santiago Atitlán | 0a6 | M52 | 0.2162 |
| Núcleo I, Santiago Atitlán | 6a14 | M53 | 0.2167 |

| | | | |
|---|-------|-----|--------|
| Núcleo I, Santiago Atitlán | 6a14 | M54 | 0.2147 |
| Núcleo I, Santiago Atitlán | 14a26 | M55 | 0.2123 |
| Núcleo I, Santiago Atitlán | 14a26 | M56 | 0.2195 |
| Núcleo I, Santiago Atitlán | 26a37 | M57 | 0.2133 |
| Núcleo I, Santiago Atitlán | 26a37 | M58 | 0.2170 |
| Núcleo II, Santiago Atitlán | 0a10 | M59 | 0.2180 |
| Núcleo II, Santiago Atitlán | 0a10 | M60 | 0.2141 |
| Núcleo II, Santiago Atitlán | 10a24 | M61 | 0.2153 |
| Núcleo II, Santiago Atitlán | 10a24 | M62 | 0.2144 |
| Núcleo II, Santiago Atitlán | 24a29 | M63 | 0.2120 |
| Núcleo II, Santiago Atitlán | 24a29 | M64 | 0.2127 |
| Núcleo II, Santiago Atitlán | 29a43 | M65 | 0.2180 |
| Núcleo II, Santiago Atitlán | 29a43 | M66 | 0.2109 |
| Blanco Control 1 | | M67 | 0 |
| Blanco Control 2 | | M68 | 0 |
| Sedimento IAEA-158 | | M69 | 0.2152 |
| Sedimento IAEA-158 | | M70 | 0.2158 |
| Proficiency test IAEA-CU-2010-02 | | M71 | 0.2120 |
| Proficiency test IAEA-CU-2010-02 | | M72 | 0.2152 |
| TRACE ELEMENTS AND METHYLMERCURY IN FISH TISSUE IAEA-407 | | M73 | 0.2116 |
| TRACE ELEMENTS AND METHYLMERCURY IN FISH TISSUE IAEA-407 | | M74 | 0.2134 |

Fuente: datos experimentales

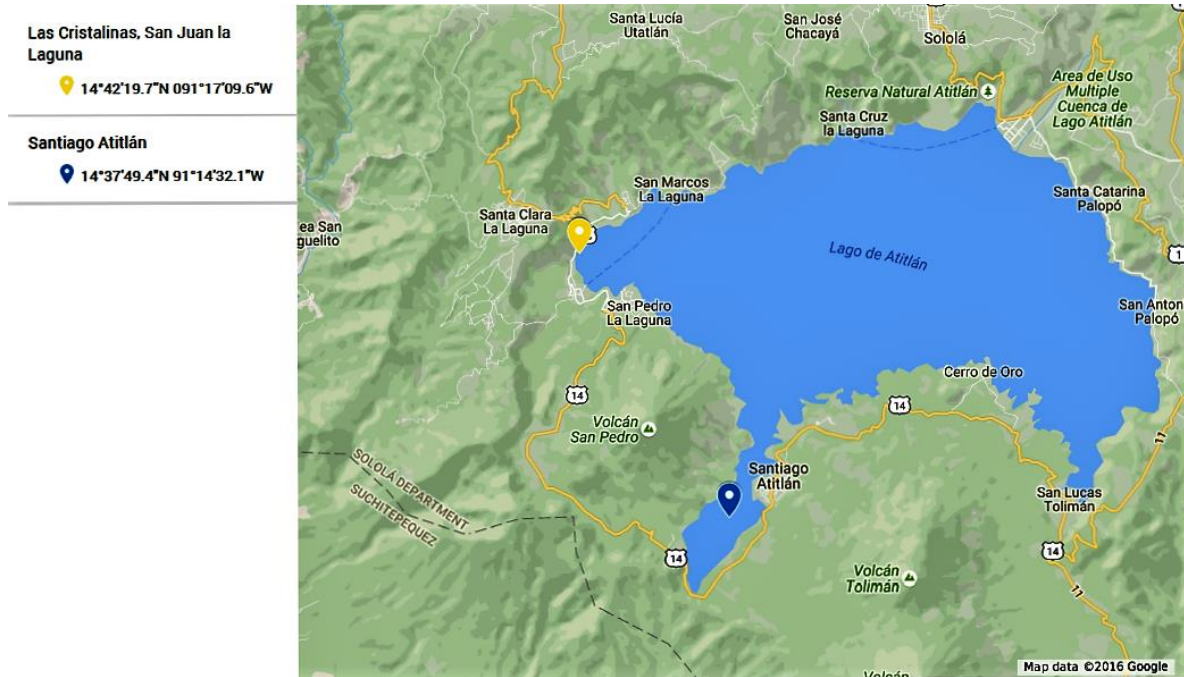
Tabla No.24. Fotografías

| | |
|--|--|
| <p>Fotografía No.1.</p> <p>Medición de cromo por espectrómetro de absorción atómica en muestras de sedimentos digeridos.</p> |  |
|--|--|

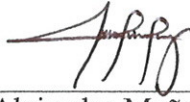
| | |
|---|--|
| <p>Fotografía No.2.</p> <p>Limpieza cualitativa de cristalería y tubos falcon.</p> |  |
| <p>Fotografía No.3.</p> <p>Vista superior de un sedimento dentro del vaso de teflón luego de adicionarle ácido nítrico y peróxido de hidrógeno.</p> |  |
| <p>Fotografía No.4.</p> <p>Horno de microondas empleado para la digestión ácida de los sedimentos</p> |  |
| <p>Fotografía No.5.</p> <p>Muestras de sedimentos digeridas listas para su filtración por gravedad.</p> |  |
| <p>Fotografía No.6.</p> <p>Muestras filtradas y aforadas a 25 mL.</p> |  |

Fuente: teléfono Samsung Galaxy S4, cámara fotográfica Kodak EasyShare C122

Imagen No. 26. Mapa de los sitios de muestreo de núcleos de sedimentos

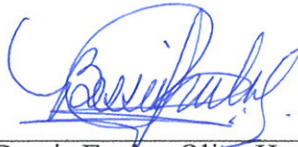


Fuente: GPSmap (60CSx, GARMIN), Google maps



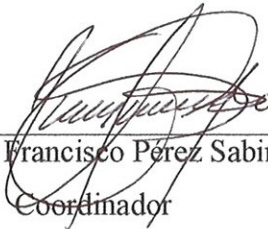
Manuel Alejandro Muñoz Wug

Autor



M.Sc. Bessie Evelyn Oliva Hernández

Asesora



Dr. Juan Francisco Pérez Sabino

Coordinador



M.Sc. Irma Nohemí Orozco Godínez

Directora Escuela de Química



Dr. Rubén Dariel Miranda Velásquez

DECANO