

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ciencias y Humanidades



Determinación de Trazas de Arsénico y Plomo  
en Aguas del Lago de Guatemala

Trabajo de graduación presentado por José Ricardo Del Aguila para optar al  
grado académico de Licenciado en Química

Guatemala,

2026



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ciencias y Humanidades



Determinación de Trazas de Arsénico y Plomo  
en Aguas del Lago de Guatemala

Trabajo de graduación presentado por José Ricardo Del Aguila para optar al  
grado académico de Licenciado en Química

Guatemala,

2026

Vo. Bo.



(f)

Lic. Angelika Rebecca Hasselmann Aran

Tribunal Examinador:



(f)

Lic. Angelika Rebecca Hasselmann Aran



(f)

Lic. Irma Patricia Orellana Catalan



(f)

Lic. Isis Aracely López Cifuentes

Fecha de aprobación del examen de graduación:  
Guatemala 9 de junio del 2025

## AGRADECIMIENTO

A toda mi familia, por su amor incondicional, por creer en mí incluso cuando yo dudaba, y por brindarme el apoyo emocional, moral y económico que me permitió seguir adelante. Gracias por su paciencia, sus palabras de aliento en los momentos más difíciles y por estar siempre presentes, celebrando cada pequeño logro conmigo. Sin ustedes, esta meta no habría sido posible.

A mi asesora, Angelika Hasselmann, por apoyarme incondicionalmente y por ser una de las pocas personas dentro del ámbito académico que verdaderamente confió en mí. Su compromiso, empatía y vocación docente me inspiran profundamente.

A la directora de carrera Irma Orellana, por brindarme su respaldo en los momentos en que más lo necesité, incluso cuando sentía que todo estaba en mi contra. Gracias por abrirme las puertas, por escucharme y por ayudarme a seguir adelante cuando la situación parecía insostenible.

A Delmi, del Departamento de Química, por su apoyo constante, por hacer tiempo para reunirse conmigo cuando nadie más podía, y por ayudarme a resolver cada uno de los problemas que se presentaron en el camino. Por su disposición y amabilidad.

A todos los amigos y profesores que compartieron conmigo en el transcurso de los años

## CONTENIDO

|                                                      |            |
|------------------------------------------------------|------------|
| <i>AGRADECIMIENTO</i> .....                          | <i>i</i>   |
| CONTENIDO.....                                       | ii         |
| <i>LISTA DE CUADROS</i> .....                        | <i>iii</i> |
| <i>LISTA DE FIGURAS</i> .....                        | <i>iv</i>  |
| RESUMEN.....                                         | v          |
| I. INTRODUCCIÓN.....                                 | 1          |
| II. OBJETIVOS.....                                   | 2          |
| HIPÓTESIS.....                                       | 3          |
| III. JUSTIFICACIÓN.....                              | 4          |
| IV. MARCO TEÓRICO .....                              | 5          |
| A. Lago de Guatemala.....                            | 5          |
| B. Lago y cuerpos de agua.....                       | 6          |
| C. Contaminantes químicos (Metales pesados) .....    | 6          |
| D. Método de cuantificación de metales pesados ..... | 7          |
| E. Desechos .....                                    | 11         |
| V. METODOLOGÍA.....                                  | 12         |
| A. Sitio de estudio .....                            | 12         |
| B. Sujeto de estudio.....                            | 12         |
| C. Diseño, enfoque y tipo de investigación .....     | 12         |
| D. Tipo y tamaño de muestra.....                     | 12         |
| E. Criterios de inclusión y exclusión .....          | 12         |
| F. Variables .....                                   | 13         |
| G. Instrumentación .....                             | 14         |
| H. Metodología .....                                 | 14         |
| I. Reactivos .....                                   | 15         |
| J. Cristalería .....                                 | 15         |
| K. Desechos .....                                    | 15         |
| VI. RESULTADOS .....                                 | 16         |
| VII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....                   | 18         |
| A. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....                      | 18         |
| B. EVALUACION DEL MÉTODO .....                       | 19         |
| VIII. CONCLUSIONES .....                             | 20         |
| IX. RECOMENDACIONES .....                            | 21         |
| X. BIBLIOGRAFÍA .....                                | 22         |
| XI. ANEXOS.....                                      | 25         |

## LISTA DE CUADROS

|                                                                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Cuadro 1. Tipos de métodos para analizar metales pesados .....                                                    | 7  |
| Cuadro 2. Variables medidas en la evaluación del método de plomo para la<br>cuantificación de agua.....           | 13 |
| Cuadro 3. Variables medidas en la evaluación del método de arsénico para la<br>cuantificación de agua.....        | 13 |
| Cuadro 4. Longitud de onda utilizado para cada elemento.....                                                      | 14 |
| Cuadro 5. Parámetros del equipo ICP-OES.....                                                                      | 15 |
| Cuadro 6. Concentración de plomo en agua del lago.....                                                            | 16 |
| Cuadro 7. Concentración de arsénico en agua del lago.....                                                         | 16 |
| Cuadro 8. Límite de detección y cuantificación del método de plomo y arsénico .....                               | 16 |
| Cuadro 9. Valores de intensidad obtenida ICP-OES de las diferentes profundidades<br>de plomo y arsénico .....     | 27 |
| Cuadro 10. Valores de concentración obtenida ICP-OES de las diferentes<br>profundidades de plomo y arsénico ..... | 28 |
| Cuadro 11. Valores de Intensidad de blancos y para la regresión lineal.....                                       | 29 |
| Cuadro 12. Valores de intensidad de los blancos.....                                                              | 29 |
| Cuadro 13. Anova de un factor de las medias de plomo .....                                                        | 31 |
| Cuadro 14. Anova de un factor de las medias de arsénico .....                                                     | 31 |
| Cuadro 15. Anova de un factor de las medias de plomo 20m y 50m .....                                              | 31 |
| Cuadro 16. Anova de un factor de las medias de arsénico 20m y 50m .....                                           | 31 |
| Cuadro 17. Prueba Tukey HSD de las concentraciones de plomo .....                                                 | 31 |
| Cuadro 18. Prueba Tukey HSD de las concentraciones de arsénico .....                                              | 31 |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Gráfica de las concentraciones de plomo .....                                                                                                                                 | 17 |
| Figura 2. Gráfica de las concentraciones de arsénico .....                                                                                                                              | 17 |
| Figura 2. Imagen del equipo de emisión óptica con plasma acoplado<br>inductivamente (ICP-OES) utilizado para el trabajo de graduación.....                                              | 24 |
| Figura 3. Imagen del Nebulizador y Cámara de nebulización del equipo de emisión<br>óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES) utilizado para el trabajo de<br>graduación. .... | 25 |
| Figura 4. Imagen del plasma de argón en forma de antorcha.....                                                                                                                          | 26 |
| Figura 5. Curva de calibración de plomo regresión lineal .....                                                                                                                          | 30 |
| Figura 6. Curva de calibración de arsénico regresión lineal .....                                                                                                                       | 30 |
| Figura 7. Imagen de los espectros de la regresión lineal de Plomo.....                                                                                                                  | 33 |
| Figura 8. Imagen de los espectros de la regresión lineal de arsénico .....                                                                                                              | 34 |

## RESUMEN

El agua, fuente vital para los ecosistemas y para la humanidad, enfrenta un deterioro progresivo. Lo que alguna vez fue símbolo de vida, esencial para todos, hoy es tratado como un basurero. Este trabajo de investigación consiste en determinar trazas de plomo y arsénico en aguas de un lago de Guatemala. El propósito es evaluar el nivel de contaminación de estos metales pesados presentes en el agua, identificar si pueden causar posibles riesgos a la comunidad y al ambiente, y proporcionar una base científica para implementar medidas correctivas y de prevención.

Hay varias metodologías y técnicas para poder cuantificar trazas de metales pesados. Para este trabajo de graduación se utilizará un método normalizado utilizando la teoría de espectroscopia óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES), lo cual nos permitirá obtener valores muy precisos y concentraciones en niveles muy bajas.

Obtener datos precisos es fundamental para tomar medidas informadas y restaurar los niveles adecuados de calidad del agua del lago, garantizando su conservación para las generaciones futuras. Se busca que este trabajo se tome como base para realizar futuras decisiones que impliquen el cuidado y uso del agua del lago.

Se determinó con el método mencionado que se puede identificar trazas de arsénico y plomo. Se obtuvo unas concentraciones de (ppb). Los resultados mostraron que todas las muestras del lago la concentración de plomo (Pb) y arsénico (As) se encuentran altas y entre mayor sea la profundidad mayor es la concentración.

## I. INTRODUCCIÓN

Los lagos de Guatemala son conocidos por su belleza escénica y su importancia ecológica, cultural y económica para el país. Sin embargo, en los últimos años, la creciente actividad humana en la cuenca del lago generó preocupación por la contaminación generado en el lago. Los contaminantes más preocupantes son metales pesados como el plomo y el arsénico, que representaban serios riesgos para la salud pública y el medio ambiente (OMS, 2019).

Incluso en pequeñas concentraciones estos metales pueden causar una gran variedad de problemas a la salud. La presencia de estos en el agua del lago y fuentes cercanas ponen en peligro la biodiversidad y al ambiente, además de afectar a las comunidades locales que dependen de los recursos del lago. Consumir o utilizar el agua contaminada causan diversas enfermedades, como daño renal, problemas cardiovasculares, trastornos neurológicos, cáncer de piel, vejiga y pulmones, así como efectos adversos en el desarrollo cognitivo y físico en niños (OMS, 2019).

Obtener datos de los metales será muy útil, ya que se está trabajando con el centro de estudios de Atitlán, lo cual busca tener datos exactos y actualizados del lago. Esto con el fin de poder tomar acción y medidas si estos resultados no cumplen con las normativas de salud.

Actualmente, existen varios métodos analíticos para la cuantificación de metales pesados utilizando distintos equipos. Sin embargo, no todos son adecuados para los requerimientos específicos de esta investigación. Dado que se busca detectar concentraciones muy bajas en muestras de agua, es fundamental emplear una técnica sensible y confiable. Por esta razón, en el presente estudio se ha seleccionado la espectrometría de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES), utilizando un método normalizado desarrollado por el fabricante de dicho equipo (PerkinElmer) para la determinación de metales pesados en agua.

## II. OBJETIVOS

### A. Objetivo general

Determinar la concentración de plomo y arsénico, en partes por billón ( $\mu\text{g/L}$ ), en distintos puntos y diferentes profundidades del lago de Guatemala en el año 2024.

### B. Objetivos específicos

Obtener la concentración de plomo y arsénico, en partes por billón ( $\mu\text{g/L}$ ), utilizando un método con el equipo de Espectrometría de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES).

Comparar la concentración de plomo y arsénico de las muestras del lago con los límites aceptados para la salud humana y por las normativas de la Organización Mundial de la Salud ( $10\mu\text{g/L}$ , OMS).

Evaluar cómo varían las concentraciones de plomo y arsénico en diferentes partes del lago de Guatemala, identificando posibles fuentes de contaminación y áreas de mayor riesgo para la salud pública y el ecosistema.

## HIPÓTESIS

H1: La media de los niveles de contaminantes, como plomo y arsénico están debajo de los límites aceptables ( $10\mu\text{g/L}$  Pb y  $10\mu\text{g/L}$  As, OMS) para salud humana y normativas ambientales.

H2: La media de los niveles de contaminantes, como plomo y arsénico están arriba de los límites aceptables ( $10\mu\text{g/L}$  Pb y  $10\mu\text{g/L}$  As, OMS) para salud humana y normativas ambientales.

### III. JUSTIFICACIÓN

El estudio de los efectos de los contaminantes en un lago es crucial debido a las complejas interacciones entre los organismos vivos y su entorno acuático. El lago de Guatemala, como ecosistema vital, alberga una rica diversidad de especies animales y vegetales, y además provee agua para consumo humano y actividades económicas como la pesca y el turismo. La presencia de contaminantes como metales pesados, pesticidas y otros compuestos químicos representa una amenaza significativa para la salud humana y la sostenibilidad del lago a largo plazo. Obtener datos precisos es fundamental para tomar medidas informadas y restaurar los niveles adecuados de calidad del agua, para garantizar la conservación del lago.

El lago de Guatemala, ubicado en el departamento turístico, Guatemala, es conocido por su belleza escénica y su importancia ecológica, cultural y económica para el país. Sin embargo, en los últimos años, la creciente actividad humana en la cuenca del lago generó preocupación por la contaminación en el lago. Los contaminantes más preocupantes eran los metales pesados como el plomo y el arsénico, que representaban serios riesgos para la salud pública y el medio ambiente (OMS, 2019).

Esto genera una gran necesidad de conocer las concentraciones de metales de manera continua mediante un método/equipos precisos, que nos asegure la calidad del agua y permita reconocer riesgos.

## IV. MARCO TEORICO

### A. Lago de Guatemala

#### a. Ubicación

La contaminación de los cuerpos de agua, en Guatemala es un gran problema que afecta la calidad de vida de millones de personas y la integridad de todos los ecosistemas. El lago de Guatemala el cual se tomó las muestras es uno de los más importantes de Guatemala y más visitados. Cuenta con varias comunidades y varias viviendas albergando aproximadamente 380 mil personas (INE, s.f.; AMSCLAE, 2017; Flores A. et al., 2020). No existen ningún estudio de plomo en el lago en estos últimos años, sin embargo, hay estudios realizados hace más de 10 años que la concentración de Arsénico (As), son superiores al nivel máximo permitido para agua potable en la Norma de Agua Potable (NGO 29001) de la Comisión Guatemalteca de Normas (COGUANOR). Aun así, aunque no se considera aceptable consumir el agua de los lagos de Guatemala, muchas comunidades que utilizan esta agua en su vida cotidiana (OMS, 2019; Pérez S. et al., 2015). Por lo tanto, es importante poder evaluar cómo ha sido el incremento y la magnitud de la contaminación en el lago.

#### b. Principales contaminantes

Las principales fuentes de contaminación incluyen el vertido de aguas residuales domésticas e industriales sin tratamiento adecuado, el uso excesivo de fertilizantes y pesticidas en la agricultura, la deforestación y el cambio de uso del suelo, la acumulación de desechos sólidos, y el impacto de las actividades turísticas. Estos factores contribuyen a la eutrofización del lago, la acumulación de basura y sedimentos, y la degradación del ecosistema acuático, poniendo en riesgo tanto la biodiversidad como la salud de las comunidades locales (UNESCO, 2021).

#### c. Efectos de la contaminación

En el momento de observar niveles altos de contaminación se debería realizar siempre una investigación para informar sobre cómo tomar las acciones para la reducción progresiva de las altas concentraciones de plomo y arsénico. Estos niveles deberían ser idealmente menores a 10µg/L para para arsénico y plomo, según la organización Mundial de la salud (OMS, 2019; OMS 2022; AMSCLAE, 2017). Se ha identificado que el plomo y arsénico son uno de los 10 productos químicos de mayor preocupación para la salud pública que requieren acción inmediata, ya que genera miles de muertes al año y reduce drásticamente la calidad de vida de las personas (IHME, 2020; OMS 2019).

Actualmente, existen varias normativas y acuerdos gubernamentales para la regulación de la calidad del agua de Guatemala, como el Acuerdo gubernativo 178-2009, Decreto 90-97, artículo 88 del código de Salud, acuerdo Gubernativo 236-2006 y Acuerdo ministerial 523-2013 (Copresam, s.f.), a pesar de todo los documentos mencionados, el agua no tiene la calidad deseada en el país de Guatemala.

## B. Lago y cuerpos de agua

### d. Introducción

Muchos cuerpos de agua especialmente los grandes tienen un proceso fundamental llamado estratificación. Durante el periodo, la columna de agua de un lago se divide en 3 capas: 1 epilimnion (superficial), el metalimnion (intermedio) y el hipolimnion (profundo). De vez en cuando ciertas veces al año dependiendo del lago hay una mezcla entre lo más profundo y la superficie. El lago, ubicado en Guatemala, es un lago profundo de origen volcánico (varios metros de profundidad) y, por sus características físicas y climáticas, se clasifica típicamente como un lago monomítico cálido. Durante la estratificación, el oxígeno se puede agotar en las aguas profundas (hipolimnion), lo que afecta la distribución de especies y compuestos químicos (Sun X et. al., 2023).

Los lagos grandes de Guatemala se estratifica térmicamente la mayor parte del año, con una sola mezcla completa anual. La mezcla ocurre durante la época más fresca del año, normalmente entre diciembre y febrero, cuando la temperatura del agua superficial desciende lo suficiente como para igualarse con la del fondo, permitiendo la mezcla de toda la columna de agua (Cifuentes, 2012).

## C. Contaminantes químicos (metales pesados)

### a. Plomo

El plomo es un elemento químico en grupo 14 de la tabla periódica, con un número atómico 82 y un peso molar de 207.2 g/mol. Este es un metal pesado color blanco azulado, altamente moldeable y muy resistente a la corrosión. Este se encuentra muy poco común en su forma pura y comúnmente se encuentra en minerales como la galena, anglesita, cerusita y minium. El plomo se puede encontrar en estado de oxidación +2 y +4. El plomo se encuentra principalmente en su forma inorgánica con estado de oxidación +2. Comúnmente, se presenta en tres óxidos: óxido de plomo (2); tetraóxido de plomo y dióxido de plomo. El plomo puede reaccionar con ácidos y bases, generando sales plúmbicas en medio ácido y sales plumbitas y plumbatos en medio básico. Otra forma poco común es en forma orgánica como compuesto organoplumbicos, típicamente estado de oxidación +4, pero estos son muy raros encontrarlos en el ambiente (Carr et al., 2004; Haynes, 2014; ATSDR, 2020).

### i. Fuentes de contaminación del plomo

Aunque las principales fuentes de contaminación del agua debido al plomo provienen de sistemas de agua que contienen componentes de plomo, el plomo también puede estar presente en forma natural debido a la roca madre o en el agua subterránea. Pero en los últimos años las fuentes de agua suelen contaminarse a través de fabricación y reciclaje de baterías, actividades de alfarería o cerámica, minería (minería de sulfuro de plomo, Galena), pinturas/tintes, fundición de metales, incineración de residuos municipales e incineración de carbón (USEPA, 1998; Health Canada, 2019; OMS, 2019). Sin embargo, en cuerpos de agua como los lagos, el plomo tiende a acumularse más en los sedimentos y el suelo que en las aguas superficiales, los niveles de

concentración de plomo en fuentes de agua son muy raras que ocurran naturalmente (OMS, 2022).

## b. Arsénico

El arsénico es un elemento químico en el grupo 15 de la tabla periódica, conocido como del grupo del nitrógeno o nitrogenoides, con un numero atómico 33 y un peso molar de 74.9216 g/mol. Este tiene propiedades de un metal y no metal; sin embargo, este tiene a referirse como un metal. El metal arsénico normalmente ocurre como  $\alpha$ -cristalino, que es un sólido quebradizo color gris y su forma  $\beta$  como un sólido amorfo de color gris oscuro (ATSDR, 2007). El arsénico se encuentra en tres estados de oxidación, -3, +3 y +5, estos compuestos pueden ser inorgánicos y orgánicos con enlaces Arsenico-carbono. En las aguas naturales se encuentra principalmente en formas inorgánicas de arsenito (As(3)) y arsenato (As(5)), siendo la primera forma el As(3) la más tóxica (Jain & Ali, 2000; Kamyabi, 2015). El estado de oxidación del arsénico en el medio ambiente depende, en parte del pH, el pH neutro entre 6.3 y 7.5, los arsenatos son más estables, mientras en condiciones ácidas o básicas, los arsenitos suelen predominar (Smedley, et al., 2002).

## ii. Fuentes de contaminación de arsénico

El arsénico es un elemento natural que se puede encontrar en el agua subterránea, especialmente en regiones volcánicas, como la región del lago. Los volcanes pueden liberar grandes cantidades, el cual se depositan en el suelo y las fuentes de agua cercana. Esta contaminación puede tener también causas antropogénicas, como la fundición de minerales, herbicidas, desechos de industrias, plaguicidas y muchos preservantes de productos (Pérez S. et al., 2015).

## D. Método de cuantificación de metales pesados

### a. Métodos para metales pesados

Cuadro 1. Tipos de métodos para analizar metales pesados

| Metodología                                                         | Descripción                                                                                                                               |
|---------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Espectroscopía de emisión-plasma inductivo de argón (ICP-OES)       | Equipo con alta sensibilidad y límites de detección bajos. Mayor rapidez y procedimiento sencillo. Pero es costoso. Multielemental        |
| Métodos espectrofotométricos UV-Vis                                 | Simple y económico. Tardado y límites altos.                                                                                              |
| Absorción atómica-generación de hidruros (AAS-H)                    | Límites mayores y relativamente económico. Metodología sencilla y rápida. Pero la preparación de la muestra es tardada.                   |
| Absorción atómica con horno de grafito (AAS GF)                     | Requiere equipo costoso, no es tan sensible. Metodología sencilla y rápida.                                                               |
| Espectrometría de masas con plasma inductivamente acoplado (ICP-MS) | Equipo con alta sensibilidad y límites de detección aún más bajos que el óptico. Mayor rapidez y procedimiento sencillo. Pero es costoso. |

Nota. Litter & Morgada, 2009.

## b. Espectroscopia de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP)

Una de las técnicas más eficientes para el análisis multielemental es la espectroscopía de emisión atómica. En este método, se utilizan diferentes fuentes de energía para excitar los átomos de las muestras, permitiendo que emitan luz a longitudes de onda específicas, lo que facilita la identificación y cuantificación de varios elementos simultáneamente. En la espectroscopía con plasma de argón, se emplean tres tipos principales de fuentes de energía. La primera es una fuente de arco de corriente continua (cd), que genera una corriente intensa entre electrodos sumergidos en el plasma de argón. Las otras dos son generadores de radiofrecuencia y microondas que también utilizan el flujo de argón. Entre estas, el plasma acoplado inductivamente (ICP) es el más utilizado debido a su alta sensibilidad y baja interferencia, siendo ampliamente comercializado para aplicaciones en espectroscopía de emisión óptica y espectrometría de masas (Skoog, 2015).

Este método comparte similitudes teóricas con la espectroscopía de absorción atómica, ya que ambos se basan en la interacción entre la luz y los átomos de una muestra para detectar y cuantificar los elementos presentes. Sin embargo, la espectroscopía de emisión atómica, especialmente cuando se utiliza plasma acoplado inductivamente (ICP-OES), ofrece ventajas significativas en términos de rapidez y capacidad para analizar múltiples elementos en una sola medición. En cuanto a los límites de detección (LOD), el ICP-OES permite alcanzar valores muy bajos para elementos tóxicos como el arsénico (As) y el plomo (Pb), se reporta que los límites de detección (LOD) para arsénico (As) y plomo (Pb) mediante ICP-OES se encuentran en el rango de 1.5 a 2.0  $\mu\text{g/L}$ . Estos valores fueron determinados a partir de 7 a 10 mediciones de blancos adaptados a la matriz (Koller, G. 2023).

El equipo tiene un eje óptico donde se debe alinear para calibrar el sistema. Esto consiste en alinear el sistema para que las longitudes de onda detectadas coincidan con los valores reales de emisión de los elementos. El equipo utiliza nebulizadores y cámara de nebulización que permite mejorar la precisión y sensibilidad del análisis. Estos trabajan en transformar la muestra líquida en un aerosol fino adecuado para su introducción al plasma (Boss, 2004).

El análisis por ICP, ya sea OES o MS, presenta limitaciones y factores que afectan la exactitud de los resultados. El principal es la interferencia espectral cuando dos líneas de emisión se traslapan o iones con misma relación masa/carga interfieren. también hay interferencias físicas por si es demasiado alta las concentraciones cambian la tensión superficial de la muestra, disminuyendo del aerosol que se dirige al plasma. Uno de los errores comunes es contaminación cruzada con concentraciones demasiado bajas. Además, la deriva instrumental (drift) puede ocurrir con el tiempo debido al desgaste de componentes o cambios de temperatura.

### c. Espectrometría UV-VIS

Los métodos colorimétricos con UV VIS. Los métodos de espectrofotometría son con alta sensibilidad y precisión, pero principalmente más accesibles y menor costo (Abhijnan et al., 2023). La espectroscopía UV-Vis se basa en la medición de la absorbancia de la luz ultravioleta (UV) o visible por una muestra. La absorbancia se relaciona con la concentración de las especies absorbentes en la muestra. Un espectrofotómetro UV-Vis utiliza una lámpara de deuterio para luz UV (100-400 nm) y una lámpara de tungsteno-halógeno para luz visible (400-800 nm). Estas lámparas emiten luz de amplio espectro que abarca tanto el rango UV como el visible. Esta luz pasa a través de un monocromador, que puede ser un prisma o una red de difracción. El monocromador selecciona la longitud de onda específica de luz que se enviará a través de la muestra, luego es medida por un detector, que convierte la luz en una señal eléctrica. Los detectores comunes incluyen fotomultiplicadores y fotodiodos, que son sensibles a la intensidad de la luz transmitida (Skoog et al., 2015; Chen, H. 2020).

En cuanto a los límites de detección (LOD), el UV-Vis permite alcanzar valores para elementos tóxicos como el arsénico (As) con LODs de 1.5 µg/L lo que lo convierte en una herramienta valiosa en el análisis ambiental y de seguridad alimentaria. Pero la preparación de la muestra es muy tardada (Spectro, s.f.). La radiación electromagnética se caracteriza por su longitud de onda ( $\lambda$ ), una la frecuencia de la onda y otra la energía. La molécula absorbe observe las longitudes específicas lo cual los electrones pueden ser promovidos a niveles de energía más altos y estados más excitados. La diferencia de energía entre el estado fundamental, esto se relaciona por la ecuación de Planck . (Skoog et al., 2015).

Ecuación 1: ecuación de Planck

$$E = h\nu = Hc\lambda^{-1}$$

Donde E es la energía del fotón, h es la constante de Planck ( $6.626 \times 10^{-34} \text{Js}$ ),  $\nu$  es la frecuencia de la luz ( $\text{s}^{-1}$ ),  $\lambda$  es la longitud (m) y c la velocidad de la luz ( $2.998 \times 10^8 \text{ms}^{-1}$ ). Esto se da como el resultado de las interacciones entre los fotones y electrones del oxígeno, nitrógeno, azufre y los halógenos. Para los compuestos inorgánicos, los iones y complejos de elementos de transición absorben bandas de radiación visible, por lo que presentan su coloración característica, debido a sus electrones del orbital d (Skoog et al., 2015).

Ecuación 2: ecuación de absorción atómica de Berr Lambert

$$A = -\log T = -\log(I/I_0) = \epsilon cl$$

#### d. Absorción atómica

Los métodos de análisis de plomo incluyen el método de absorción atómica, la espectrometría de emisión de plasma acoplado y espectrometría de masas. El método de absorción atómica tiene ventajas, pero suele tener un bajo límite de detección, alta precisión, buena selectividad, menor muestra y amplia gama de aplicaciones. Este método se basa en el proceso el cual se excita el átomo con una llama. Los átomos poseen electrones dispuestos en los orbitales en su estado con menor energía. Dicho estado, dominado basal, es el más estable energéticamente. A la hora de que se exciten los átomos y regresan a su estado más estable, la energía que absorción en el proceso para excitarse es emitida, siendo este el principio de la absorción atómica. La fuente de luz o energía, de una lámpara, con una intensidad inicial se enfoca hacia una celda que contiene átomos en estado basal, atomizados por la llama los cuales nos dan la información de la transmitancia o absorbancia para poder así relacionar su intensidad con la concentración del átomo (B. Keber et. Al, 1993; Skoog et al. 2015).

En cuanto a los límites de detección (LOD), el ICP-OES permite alcanzar valores muy bajos para elementos tóxicos como el plomo (Pb) y arsénico (As), con LODs de 1 µg/L, lo que lo convierte en una herramienta valiosa en el análisis ambiental y de seguridad alimentaria (Spectro, s.f.).

Cuando la luz de la lámpara con una intensidad inicial pasa a través de la muestra este interacciona con los átomos, los cuales absorben cierta cantidad de energía, por lo cual se le llama transmitancia. Este es una relación de la intensidad de una fuente de radiación y luego la intensidad que atraviesa el medio absorbente, siendo  $I_0$  la intensidad inicial y  $I$  la intensidad final (Skoog et al., 2015).

*Ecuación 5: Ecuación de transmitancia*

$$T = \frac{I}{I_0}$$

Por otro lado, la absorbancia que es una relación de igual manera, pero relaciona la energía inicial de un haz de radiación con la energía tras haber pasado por un medio absorbente, lo contrario de transmitancia. Este relaciona la energía de igual manera que la ecuación 2 de absorción de Berr Lambert (Skoog et al., 2015).

El equipo de absorción atómica es muy específico y sensible, por lo que tiene pocas interferencias, pero puede haber casos que haya interferencia espectral que absorben en la misma longitud de onda. Cabe mencionar, que también las lecturas pueden ser afectadas a la hora de la atomización esto debido que la concentración es muy baja y haya una interferencia de fondo. Para esto se puede hacer una corrección de fondo de una fuente continua, debido a la dispersión de radiación, por lo que se puede agregar un exceso del interferente tanto como en la muestra como los estándares, como un amortiguador de la radiación (Skoog et al., 2015).

## E. Desechos

### a. Manipulación

Tanto el plomo como el arsénico se clasifican como residuos peligrosos según la mayoría de las regulaciones ambientales, como las establecidas por la EPA (Agencia de Protección Ambiental de los EE. UU.) y el acuerdo gubernativo 164-2021 de Manejo de Residuos Peligrosos. Por lo tanto, se requiere que los laboratorios e industrias que generen estos residuos los gestionen adecuadamente para minimizar el riesgo de exposición y contaminación ambiental (EPA, 2021; OSHA, 2012).

Los recipientes deben estar sellados herméticamente y almacenados en áreas designadas para residuos peligrosos, evitando su exposición al medio ambiente y reduciendo el riesgo de derrames (EPA, 2021; OSHA, 2012).

### b. Descarte

Los residuos, una vez que han sido almacenados en recipientes debidamente etiquetados y señalizados como "metales pesados o contaminantes tóxicos", deben ser transportados en contenedores especiales a una empresa autorizada con las normativas del país que cumpla con las regulaciones para el manejo seguro de desechos peligrosos. Los residuos de plomo y arsénico generalmente requieren un tratamiento previo para inmovilizarlos. Esto puede incluir la solidificación de los residuos o su mezcla con materiales que reduzcan su solubilidad, evitando la lixiviación (EU, 2008).

## V. METODOLOGÍA

### A. Sitio de estudio

El presente trabajo de graduación se llevó a cabo en el Departamento de Química y la Universidad el Valle de Guatemala. Las muestras fueron recolectadas en diferentes partes de un lago dentro del país de Guatemala.

### B. Sujeto de estudio

El sujeto de estudio fue la contaminación del agua de diferentes sitios del lago, enfocándose específicamente en la presencia de plomo y arsénico.

### C. Diseño, enfoque y tipo de investigación

Se trata de una investigación experimental con un enfoque de investigación cuantitativa para la concentración de arsénico y plomo en las distintas muestras de los sitios de lago.

### D. Tipo y tamaño de muestra

Se seleccionaron 3 sitios de muestreos en coordinación con el centro de estudios de Atitlán. Las muestras fueron analizadas por duplicado, calculándose el promedio y la desviación estándar para cada caso. Los sitios fueron definidos como áreas con evidencia de mayor contaminación, caracterizadas por la presencia significativa de desechos en el lago.

El muestreo se realizó a finales del año 2024 mediante un proceso externo, y las muestras fueron posteriormente enviadas a la capital para su análisis. En cada sitio se recolectó una muestra de agua de 500mL, considerando diferentes profundidades (20m, 50m, 100m y 300m), con el objetivo de determinar la concentración de los metales pesados.

### E. Criterios de inclusión y exclusión

Se utilizaron muestras de diferentes partes del lago. De los cuales son seleccionadas las muestras de agua sin desechos sólidos, con un volumen insuficiente para análisis completos y en duplicado al menos 1 metro de distancia de la primera toma. Esto garantizará que los resultados sean precisos y relevantes para evaluar la calidad del agua y su impacto en la salud pública y el medio ambiente. Se enviará unas muestras a otro laboratorio para confirmar los resultados obtenidos.

## F. Variables

Cuadro 2. Variables medidas en la evaluación del método de plomo para la cuantificación de agua

| Variable                                       | Cuantificación de plomo                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Definición conceptual                          | Presencia de plomo en un volumen de agua en diferentes sitios del lago.                                                                                                                                                                                                                                              |
| Indicador                                      | Concentración de plomo de las muestras de agua                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Dimensiones                                    | Microgramos de plomo por litro de agua del lago ( $\mu\text{g/L}$ )                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Instrumento de medición                        | Concentración de plomo obtenida por el equipo de ICP-OES                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Límite de detección / límite de cuantificación | La menor concentración que se puede detectar a un cierto nivel de confianza y menor cantidad que se puede cuantificar con exactitud y precisión (Skoog, et al, 2015).                                                                                                                                                |
| Definición operacional                         | Determinar los niveles de plomo en muestras ambientales para compararlos con los límites de seguridad establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y otras normativas relevantes, a fin de evaluar el cumplimiento de los estándares de calidad del agua y su impacto en la salud humana (IHME, 2020). |

Cuadro 3. Variables medidas en la evaluación del método de arsénico para la cuantificación de agua

| Variable              | Cuantificación de arsénico                                                 |
|-----------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| Definición conceptual | Presencia de arsénico en un volumen de agua en diferentes sitios del lago. |
| Indicador             | Concentración de arsénico de las muestras de agua                          |
| Dimensiones           | Microgramos de arsénico por litro de agua del lago ( $\mu\text{g/L}$ )     |

| Variable                                       | Cuantificación de arsénico                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Instrumento de medición                        | Concentración de arsénico obtenida por el equipo de ICP-OES                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Límite de detección / límite de cuantificación | La menor concentración que se puede detectar a un cierto nivel de confianza y                                                                                                                                                                                                                                           |
|                                                | menor cantidad que se puede cuantificar con exactitud y precisión (Skoog, et al., 2015).                                                                                                                                                                                                                                |
| Definición operacional                         | Determinar los niveles de arsénico en muestras ambientales para compararlos con los límites de seguridad establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y otras normativas relevantes, a fin de evaluar el cumplimiento de los estándares de calidad del agua y su impacto en la salud humana (IHME, 2020). |

## G. Instrumentación

Espectrometría de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES) modelo AVIO 550 Max marca Perkin Elmer (Mantenimiento y calibración realizado el 13 de diciembre 2024). Con Cámara de nebulización de cuarzo y nebulizador acoplados al ICP-OESr OneNeb. Auto sampler.

## H. Metodología

- Muestreo
  1. Tomar muestras en frascos de polietileno previamente lavado con Ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) 67%.
  2. Filtrar muestras con membrana 0.45 µm y mantenerlo en pH menor a 2.
- Preparación de muestra
  1. Tomar 100mL de muestra acidificada
  2. Evaporar en baño de agua en una estufa (sin llegar a ebullición) hasta reducir el volumen 10-15mL (preconcentración 10:1).
  3. Dejar enfriar y transferir a un balón aforado de 10mL aforarlo con HCl.
- Preparación de estándares
  1. Usar soluciones estándar de Pb y As (1000ppm)
  2. Preparar 5 concentraciones de 100 µg/L a 500 µg/L
- Instrumentación
  1. Colocar los parámetros siguientes en el equipo.

Cuadro 4. Longitud de onda utilizado para cada elemento

| Elemento | Longitud de onda (nm) |
|----------|-----------------------|
| As       | 188.981               |
| Pb       | 220.352               |

Cuadro 5. Parámetros del equipo ICP-OES

| Parámetro              | Valor               |
|------------------------|---------------------|
| Potencia de RF         | 1300 watts          |
| Gas Flow plasma        | 15 L/min            |
| Gas Flow auxiliar      | 0.2 L/min           |
| Gas Flow nebulizador   | 0.55 L/min          |
| Flow rate              | 2.5 mL/min          |
| Nebulizador            | Concéntrico         |
| Cámara de nebulización | Ciclónica de cuarzo |

## I. Reactivos

- Ácido clorhídrico (HCl) 37%
- Ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) 67%
- solución estándar de arsénico (As) 1000ppm
- Solución estándar de plomo (Pb) 1000ppm
- Agua ultrapura (tipo I, resistividad  $\geq 18.2 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$ )

## J. Cristalería

- balones aforados de 100mL y balones aforados de 10mL
- Micropipeta de 1 a 1000 $\mu\text{L}$  y micropipeta de 0.1 a 1  $\mu\text{g/L}$

## K. Desechos

Todos los desechos serán almacenados de manera adecuada en las instalaciones del campus central de la Universidad del Valle, bajo la supervisión del Departamento de Química. Este departamento coordinará con la empresa Biotrash, encargada del manejo seguro de desechos que contengan metales pesados, para su correcta disposición.

## VI. RESULTADOS

Cuadro 6. Concentración de plomo en agua del lago

| Elemento | Profundidad (m) | Media (µg/L) | Desv. estándar | Intervalos confianza 95% |
|----------|-----------------|--------------|----------------|--------------------------|
| Pb       | 20              | 15.01 ±0.1   | 0.974          | ±0.45                    |
|          | 50              | 15.54 ±0.1   | 1.231          | ±0.58                    |
|          | 100             | 16.275 ±0.2  | 0.412          | ±0.19                    |
|          | 300             | 18.55 ±0.2   | 0.661          | ±0.31                    |

Los resultados obtenidos muestran una tendencia creciente en la concentración de plomo (Pb) con la profundidad del lago. La desviación estándar disminuyó con la profundidad en general, destacando una mayor precisión en la medición a 100 metros ( $\pm 0.412$  µg/L). El intervalo de confianza al 95% respalda la fiabilidad de los resultados, con valores entre  $\pm 0.19$  y  $\pm 0.58$  µg/L.

Cuadro 7. Concentración de arsénico en agua del lago

| Elemento | Profundidad (m) | Media (µg/L) | Desv. estándar | Intervalos de confianza 95% |
|----------|-----------------|--------------|----------------|-----------------------------|
| As       | 20              | 23.34 ±0.3   | 0.97           | ±0.46                       |
|          | 50              | 23.68 ±0.3   | 0.47           | ±0.22                       |
|          | 100             | 25.49 ±0.3   | 0.52           | ±0.25                       |
|          | 300             | 29.51 ±0.3   | 0.95           | ±0.45                       |

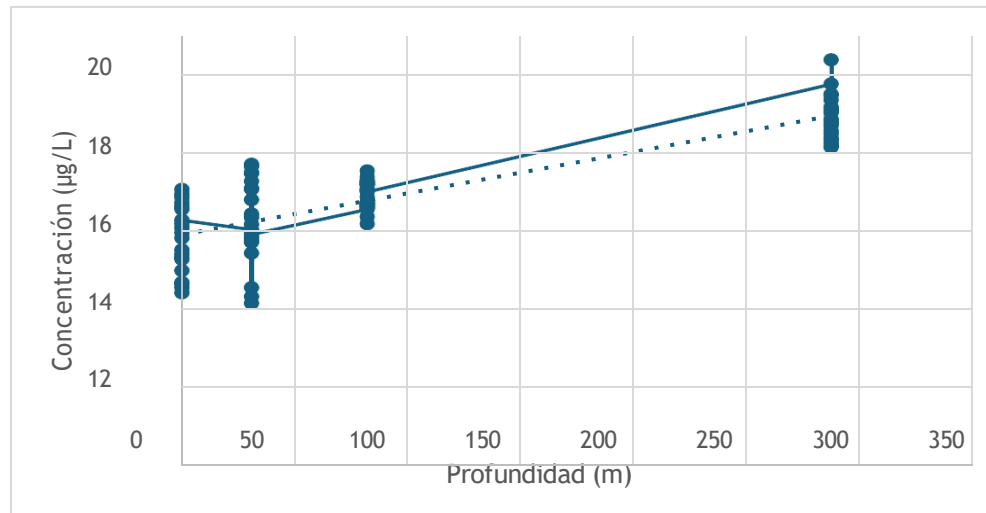
Los resultados obtenidos también muestran una tendencia creciente en la concentración de arsénico (As) con la profundidad del lago. La desviación estándar más baja ( $\pm 0.47$  µg/L) se observó a los 50 metros, indicando menor variabilidad, mientras que los intervalos de confianza al 95% oscilaron entre  $\pm 0.22$  y  $\pm 0.46$  µg/L.

Cuadro 8. Límite de detección y cuantificación del método de plomo y arsénico

| Elemento | LOD (µg/L) | LOQ (µg/L) |
|----------|------------|------------|
| Pb       | 2.33       | 1.37       |
| As       | 7.04       | 4.15       |

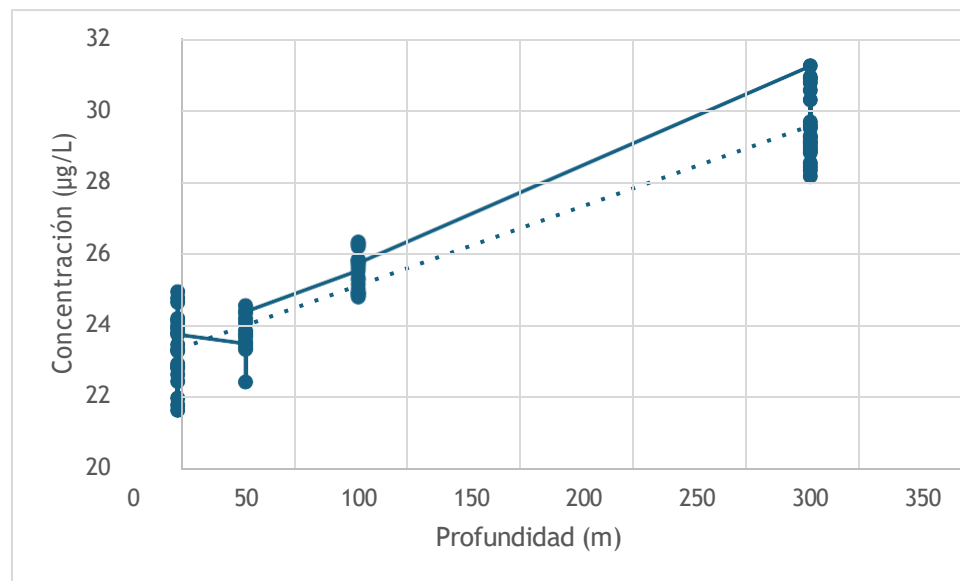
Considerando que las concentraciones de plomo y arsénico obtenidas en las muestras de agua del lago se encuentran significativamente por encima de los límites de detección (LOD) y cuantificación (LOQ) del método (2.33 y 1.37 µg/L para Pb; 7.04 y 4.15 µg/L para As), se puede afirmar con confianza que los resultados obtenidos son válidos, cuantificables y estadísticamente confiables.

Figura 1. Gráfica de las concentraciones de plomo



Se observa con mayor claridad la tendencia creciente de la concentración de plomo con la profundidad. La gráfica muestra una correlación positiva, indicando que, a mayor profundidad, mayores son las concentraciones detectadas de este metal.

Figura 2. Gráfica de las concentraciones de arsénico



Se observa con mayor claridad la tendencia creciente de la concentración de arsénico con la profundidad. La gráfica muestra una correlación positiva, indicando que, a mayor profundidad, mayores son las concentraciones detectadas de este metal.

## VII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Se obtuvo resultados del análisis de agua, lo cual permitió identificar las concentraciones y posibles implicaciones ambientales en el contexto del estudio. Se considera que la presencia de As y Pb en el lago es provocada por la posición geográfica y la cantidad de personas que viven en esta. El arsénico es común en lugares volcánicos debido a erupciones pasadas (Geólogos del mundo, 2013).

En todas las muestras se obtuvo niveles detectables de plomo y arsénico en todas las profundidades del lago. Es importante considerar que las concentraciones pueden estar influenciadas por la época del año en que se tomaron las muestras, ya que coincidió con el periodo que el lago experimenta la estratificación térmica, la mezcla anual o el inicio de las lluvias. Durante esta fase sucede normalmente diciembre y febrero, la columna de agua se mueve permitiendo la redistribución de nutrientes y compuestos químicos a lo largo de toda la columna (Cifuentes, 2012). Como consecuencia, existe una posibilidad que las concentraciones de la superficie se vean elevadas temporalmente por el cambio de las capas mas profundas, mientras en el fondo disminuyen ligeramente.

### A. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos se observaron que todas las muestras del lago la concentración de plomo (Pb) y arsénico (As) se encuentran altas, siendo el límite máximo permitido para el agua potable de 10  $\mu\text{g/L}$  (COGUANOR NGO 29001:99, OMS 2019). El lago cuenta con una planta de tratamiento de agua aun así superiores a los limites recomendado, estos resultados son un hallazgo muy importante, ya que no hay ninguna información sobre niveles de As o Pb en el lago, cuya agua es utilizada para consumo humano en varias comunidades.

Considerando que las concentraciones de plomo y arsénico obtenidas en las muestras de agua del lago se encuentran significativamente por encima de los límites de detección (LOD) y cuantificación (LOQ) del método (Cuadro 8 resultados), se puede afirmar con confianza que los resultados obtenidos son válidos, cuantificables y estadísticamente confiables.

Se evaluó y comparo las concentraciones en diferentes profundidades del lago. Como se menciona anteriormente esto puede variar dependiendo de la época del año. Se observo una tendencia creciente en la concentración de Pb y As con la profundidad del lago. No se observó diferencias evidentes a simple vista en las concentraciones entre las profundidades muestreadas, especialmente entre 20 m y 50 m. Por lo que se realizó un análisis ANOVA (cuadros 13 y 14 anexos) de un factor para evaluar si existían diferencias significativas entre las cuatro profundidades muestreadas. Los resultados indicaron que sí hay diferencias estadísticamente significativas en las concentraciones entre al menos algunas de las profundidades. Sin embargo, se hizo varias pruebas estadísticas, en ambas Pb y As las profundidades de 20m y 50m no hay diferencia estadística significativa entre las concentraciones con la prueba t y Tukey HSD. Y con la prueba Tukey las demás profundidades muestran diferencia significativa (cuadros 15,16, 17 y 18 anexos). En futuras investigaciones similares no es necesario analizar el agua en ambas profundidades ya que da la mismo.

Estos resultados sugieren la presencia de contaminación en el lago, la cual podría incrementarse en el futuro si no se implementan medidas adecuadas. Sin embargo, no es posible determinar con certeza la magnitud debido a la falta de datos comparables.

## B. EVALUACION DEL MÉTODO

Para evaluar el método se utilizó la estadística, esto debido a que la investigación se enfocaba en trazas, concentraciones muy bajas en ppb. Inicialmente se realizaron pruebas con unas curvas de calibración empezando en 5ppb, lo cual se obtuvo resultados muy variados y una desviación estándar de 0.98. Por lo cual se optó a seguir un procedimiento de un método del registro que indicaba una mejor precisión si se ajustaba, se redujo la muestra el volumen (1:10) y luego corregir el factor en los resultados.

Considerando que las concentraciones de plomo y arsénico obtenidas en las muestras se encuentran significativamente por encima de los límites de detección (LOD) y cuantificación (LOQ) del método (2.33 y 1.37  $\mu\text{g/L}$  para Pb; 7.04 y 4.15  $\mu\text{g/L}$  para As), se puede afirmar con confianza que los resultados obtenidos son válidos, cuantificables y estadísticamente confiables. Esto respalda la sensibilidad del método empleado y garantiza que las concentraciones reportadas no corresponden a ruido analítico, sino a presencia real de estos metales.

Ya que se utilizó una preconcentración, se obtuvo una desviación estándar más baja ( $\pm 0.47 \mu\text{g/L}$ ) se observó a los 50 metros en arsénico y mayor precisión en la medición a 100 metros ( $\pm 0.412 \mu\text{g/L}$ ) en plomo, indicando menor variabilidad, mientras que los intervalos de confianza al 95% oscilaron entre  $\pm 0.22$  y  $\pm 0.46 \mu\text{g/L}$ . El intervalo de confianza al 95% respalda la fiabilidad de los resultados, con valores entre  $\pm 0.19$  y  $\pm 0.58 \mu\text{g/L}$  para plomo y oscilaron entre  $\pm 0.22$  y  $\pm 0.46 \mu\text{g/L}$  para arsénico. Como se puede observar en los cuadros 1 y 2 en resultados, los análisis estadísticos indican una buena precisión y exactitud en los datos obtenidos, lo que respalda la confiabilidad de los resultados reportados.

## VIII. CONCLUSIONES

El método aplicado en el trabajo fue efectivo para la determinación de trazas de plomo y arsénico en las muestras de agua analizadas. Se obtuvieron resultados confiables y coherentes con los objetivos de la investigación, lo que confirma que el ICP-OES es un equipo muy sensible y eficaz para estos tipos de muestras. Su capacidad de detección debido por LOD y LOQ lo hace una herramienta valiosa para estudios ambientales y monitoreo del lago.

Con los resultados obtenidos se sabe que todas las concentraciones están arriba de los límites aceptables según la OMS ya que todas las muestras analizadas presentaron concentraciones elevadas de Pb y As, superando los  $10\mu\text{g/L}$ . Esta situación evidencia un riesgo potencial para la salud humana y el ecosistema. Por lo cual el agua del lago no es apta para consumir y se debe reducir la exposición de estos metales a toda la población local.

Los resultados de concentración en varias profundidades se determinaron que existen diferencias significativas en las concentraciones de Pb y As entre mayor sea la profundidad del lago. Sin embargo, esto es en excepción de las muestras de 20m y 50m, las cuales no mostraron variación significativa entre si por medio de ANOVA de un factor. Estos resultados pueden estar relacionado con la estratificación térmica y química del lago, que favorecen la acumulación de metales en las capas más profundas.

## IX. RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar muestreos periódicamente durante todo el año para obtener una base de datos representativa y continua. Esto permitirá evaluar la contaminación de los metales pesados de cualquier lago de Guatemala y facilitará la toma de decisiones informadas para su manejo ambiental. Además, es fundamental establecer datos oficiales y estandarizadas que puedan actualizarse continuamente, ya que los datos actuales son limitados y resultan insuficientes como referencia para generar un cambio significativo en la gestión ambiental del lago.

Dado que el ICP-OES es un equipo costoso y de difícil acceso en Guatemala, se sugiere explorar métodos analíticos alternativos que sean más accesibles para las instituciones encargadas al cuidado del ambiente y que permitan realizar análisis rutinarios sin comprometer la calidad de los resultados.

Así mismo, se recomienda ampliar el muestreo a todas las zonas del lago, enfocándose en áreas con mayor densidad poblacional o más vulnerables, para identificar específicamente el daño que causa la contaminación y sirve para brindar información relevante a las comunidades que lo necesiten más. El equipo se utilizó el ICP-OES del laboratorio de suelos de la empresa grupo HAME.

Es importante realizar estudios antropológicos o sociales para determinar que poblaciones consumen directamente del agua del lago. Esto facilitará la elaboración de estrategias de comunicación y educación para reducir los riesgos asociados al consumo de agua contaminada. Esto ayudaría a proponer nuevas investigaciones sobre los contaminantes del agua, enfocados en lugares vulnerables.

Por último, se recomienda revisar y optimizar los sistemas de tratamiento de agua existentes, tanto a nivel doméstico como municipal, para asegurar su eficacia frente a contaminantes como el plomo y el arsénico. Además, es importante ampliar el análisis a otros metales pesados y contaminantes emergentes, como el mercurio y el cadmio, que pueden representar riesgos adicionales para la salud humana y el ecosistema.

## X. BIBLIOGRAFÍA

- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). (2007). *Toxicological Profile for Arsenic*. Atlanta, GA: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service. DOI: 10.15620/cdc:11481.
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). (2020). *Toxicological Profile for Lead*. Atlanta, GA: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service. DOI: 10.15620/cdc:13214
- AMSCLAE (2017). Plan Operativo Anual AL 31 DE MAYO DE 2017. Technical report.
- Boss, C. B., & Fredeen, K. J. (2004). *Concepts, Instrumentation and Techniques in Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry*. PerkinElmer.
- Carr DS, Spangenberg WC, Chronley K, et al. (2004). *Lead compounds*. In: Kirk-Othmer encyclopedia of chemical technology. New York: John Wiley & Sons, 1–26.
- Copresam. (n.d.). *Normativas y acuerdos gubernamentales para la regulación de la calidad del agua de Guatemala*. Extraído de copresam.gob.gt
- Dix, M., Cifuentes, L. A., & Ramírez, M. (2012). *Ingreso de nitrógeno y fósforo al lago Atitlán (Guatemala) via deposición atmosférica*. Revista Científica, 23(1), 45–58.
- EPA. (2021). *Hazardous waste regulations: Managing lead and arsenic*. U.S. Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/hw/lead-and-arsenic>
- EU. (2008). *Directive 2008/98/EC on waste (Waste Framework Directive)*. European Commission. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/>
- F Flores-Anderson, A. I., Griffin, R., Dix, M., Romero-Oliva, C. S., Ochaeta, G., Skinner- Alvarado, J., Ramirez Moran, M. V., Hernandez, B., Cherrington, E., Page, B., & Barreno. (2020). *Hyperspectral satellite remote sensing of water quality in Lake Atitlán, Guatemala*. Frontiers in Environmental Science. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00007>
- Haynes WM. 2014. Lead. In: *CRC handbook of chemistry and physics. 95th ed*. Boca Raton, FL: CRC Press, 4–20.
- Health Canada (2019). *Guidelines for Canadian drinking water quality*. Guideline technical document: lead. Ottawa: Health Canada.
- IHME (Institute for Health Metrics and Evaluation) (2020). *Global Health Data Exchange* [website]. Seattle: IHME (<https://ghdx.healthdata.org/>, accessed 8 March 2022).
- INE (Instituto Nacional de Estadística) (n.d.). Guatemala: *Estimaciones de la Población total por municipio*. Período 2008–2020. Retrieved from: [http://www.oj.gob.gt/estadistica/reportes/poblacion-total-por-municipio\(1\).pdf](http://www.oj.gob.gt/estadistica/reportes/poblacion-total-por-municipio(1).pdf)

- Instituto Ecuatoriano de Normalización [INEN]. (2012). Estaño. Lingotes. *Determinación del Contenido de Antimonio y Arsénico*. (método de arsénico).
- Jain, C., & Ali, I. (2000). *Arsenic: occurrence, toxicity and speciation techniques*. Water Research, 34(17), 4304–4312. doi:10.1016/s0043-1354(00)00182-2
- Kamyabi, M. A., & Aghaei, A. (2016). *Electromembrane extraction and spectrophotometric determination of As(V) in water samples*. Food Chemistry, 212, https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.05.139
- Koller, G. (2023). *ICP-OES as a Viable Alternative to ICP-MS for Trace Analysis: Meeting the Detection Limits Challenge*. Spectroscopy Online. Recuperado
- Litter, M. I., & Morgada, M. E. (2009). IBEROARSEN: *Metodologías analíticas para la determinación y especiación de arsénico en aguas y suelos*. In IBEROARSEN: Metodologías analíticas para la determinación y especiación de arsénico en aguas y suelos (pp. 19–27). CYTES.
- Najim, S. S. (2013). *Determination of lead in river water by Flame Atomic Absorption Spectrometry*. Chemistry Department, College of Science, Missan University. (método plomo).
- National Research Council (US) Committee on Measuring Lead in Critical Populations. (1993). *Measuring Lead Exposure in Infants, Children, and Other Sensitive Populations*. National Academies Press (US). Retrieved from https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK236461/
- Organización de Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). (2021) "*Conservación del Lago de Atitlán y su Cuenca*." Informe de la UNESCO. TH/DOC/PIO/21/035
- OSHA. (2012). Occupational exposure to arsenic and lead: *Safety standards and protocols*. Occupational Safety and Health Administration. https://www.osha.gov/arsenic-lead
- Peréz-Sabino, F., Valladares-Jovel, B., Hernandez, E., Oliva, B., del Cid, M., & Jayes- Reyes, P. (s.f.). *Determinación de arsénico y mercurio en agua superficial del lago de Atitlán*. Unidad de análisis instrumental y departamento de análisis inorgánico, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Royal Society of Chemistry. (2023). *Review of analytical techniques for arsenic detection and determination in drinking water*. Environment Science Advances, 2, 171. DOI:10.1039/d2va00218c
- Skoog, D. A., West, D. M., Holler, J., & Crouch, S. R. (2015). *Fundamentos de química analítica* (Novena edición). Cengage Learning.
- Smedley, P. ., & Kinniburgh, D. . (2002). *A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters*. Applied Geochemistry, 17(5), 517–568. doi:10.1016/s0883-2927(02)00018-5.

- Sun, X., Wang, L., Wang, Y., & Liu, Y. (2023). *Analysis of Lake Stratification and Mixing and Their Influencing Factors*. *Water*, 15(11), 2094. <https://doi.org/10.3390/w15112094>
- T. Rupasinghe, T. J. Cardwell, R. W. Catrall, I. D. Potter, & S. D. Kolev. (2004). *Determination of arsenic by pervaporation-flow injection hydride generation and permanganate spectrophotometric detection*. *Analytica Chimica Acta*, 510, 225–230. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2004.01.073>
- USEPA (United States Environmental Protection Agency) (1998). *Sources of lead in soil: a literature review*. Washington, DC: USEPA.
- World Health Organization. (2019). *Preventing disease through healthy environments: Exposure to lead: a major public health concern*. Retrieved from WHO FCTC.
- World Health Organization. (2022). *Lead in drinking-water: Health risks, monitoring and corrective actions*. Retrieved from WHO.
- Y. He, J. Liu, Y. Duan, X. Yuan, L. Ma, R. Dhar, & Y. Zheng. (2022). *A critical review of on-site inorganic arsenic screening methods*. *Journal of Environmental Science*, 125, 453–466. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2022.01.004>

## XI. ANEXOS

Figura 3. Imagen del equipo de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES) utilizado para el trabajo de graduación



Figura 4. Imagen del nebulizador y cámara de nebulización del equipo de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES) utilizado para el trabajo de graduación

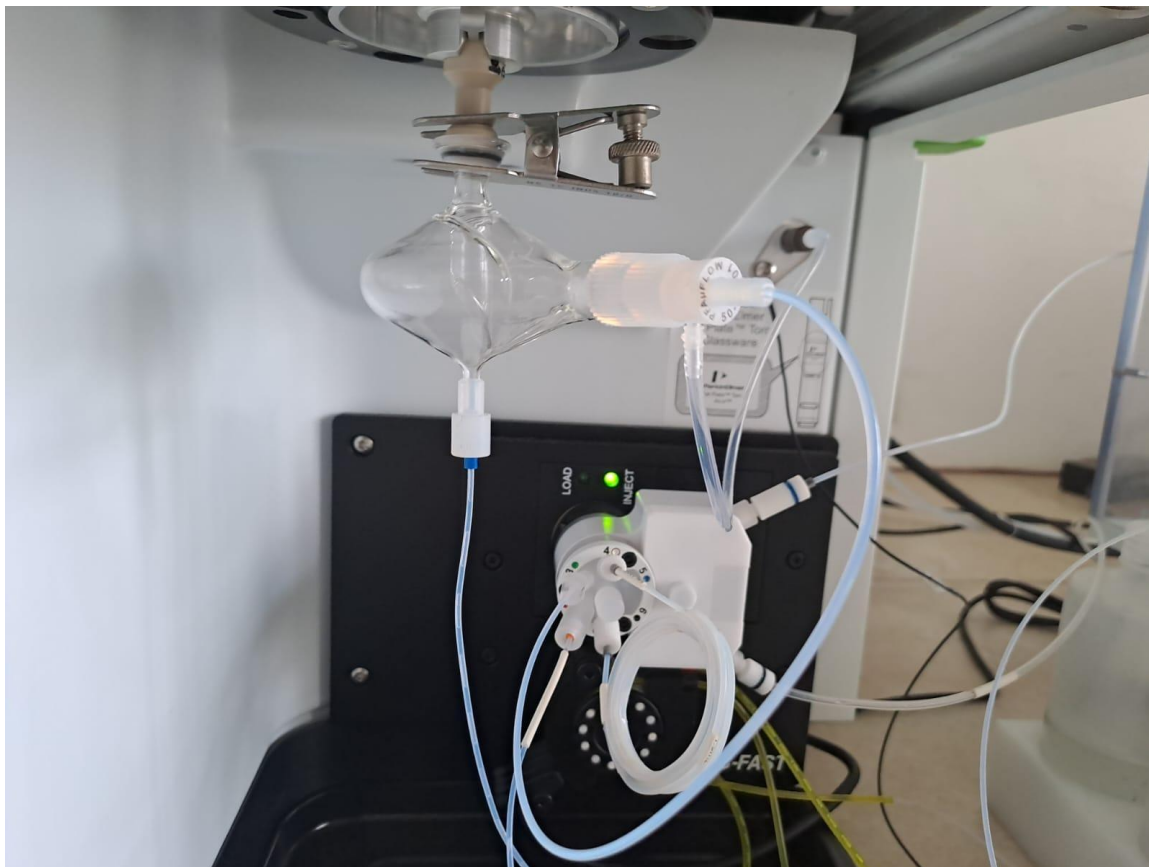


Figura 5. Imagen del plasma de argón en forma de antorcha



Cuadro 9. Valores de intensidad obtenida ICP-OES de las diferentes profundidades de plomo y arsénico

| Elemento | I en 20m | I en 50m | I en 100m | I en 300m |
|----------|----------|----------|-----------|-----------|
| Pb       | 58.3466  | 65.26474 | 67.48392  | 81.12849  |
|          | 64.90736 | 71.46284 | 69.52107  | 74.64829  |
|          | 68.75641 | 70.51469 | 68.12938  | 74.39281  |
|          | 67.79201 | 65.81375 | 67.98317  | 77.10238  |
|          | 62.19438 | 66.93511 | 70.5821   | 75.68422  |
|          | 59.29312 | 69.72305 | 67.63928  | 83.7853   |
|          | 69.10824 | 57.18474 | 70.23842  | 76.02838  |
|          | 65.42071 | 72.09824 | 68.20476  | 75.01938  |
|          | 59.4729  | 68.51392 | 69.70532  | 78.61243  |
|          | 62.54831 | 62.65341 | 70.98214  | 76.57392  |
|          | 65.83921 | 72.38476 | 66.6148   | 79.98372  |
|          | 63.01058 | 57.92357 | 65.84957  | 74.23819  |
|          | 61.98376 | 63.82736 | 67.92837  | 77.30184  |
|          | 68.18346 | 63.98576 | 67.71349  | 78.42916  |
|          | 64.32758 | 64.3495  | 70.10458  | 79.94219  |
|          | 60.76453 | 71.37567 | 70.49574  | 77.98431  |
|          | 67.45983 | 69.61843 | 68.78293  | 78.1735   |
|          | 69.61474 | 66.56049 | 71.65392  | 79.37419  |
|          | 58.91845 | 58.89347 | 70.2194   | 75.19382  |
|          | 66.25305 | 64.7381  | 69.37481  | 76.84928  |
| As       | 150.9284 | 152.2385 | 165.3849  | 201.9382  |
|          | 148.5829 | 153.4839 | 160.7385  | 197.5839  |
|          | 142.5039 | 154.5948 | 162.8494  | 184.5839  |
|          | 145.4738 | 154.3296 | 161.9837  | 191.9284  |
|          | 148.1937 | 157.8393 | 167.1039  | 189.2947  |
|          | 152.0195 | 153.9128 | 161.3842  | 188.1039  |
|          | 156.2841 | 154.103  | 160.5938  | 195.8294  |
|          | 160.3481 | 159.0385 | 166.3842  | 183.2047  |
|          | 154.9283 | 153.5839 | 170.1938  | 188.4217  |
|          | 156.7383 | 152.2948 | 165.9285  | 183.9284  |
|          | 141.2395 | 151.3847 | 169.8472  | 186.3849  |
|          | 147.8393 | 145.3841 | 169.5739  | 186.8392  |
|          | 161.5738 | 151.193  | 167.1294  | 182.1948  |
|          | 159.5748 | 152.5743 | 170.3847  | 190.7396  |
|          | 140.2848 | 155.9484 | 163.9837  | 199.5739  |
|          | 151.1293 | 156.7396 | 161.2398  | 189.1938  |
|          | 154.1938 | 151.5733 | 161.205   | 199.9841  |
|          | 155.3829 | 151.9823 | 163.5839  | 198.9372  |
|          | 146.7292 | 152.2039 | 167.2847  | 191.2398  |
|          | 153.9182 | 157.9841 | 166.7298  | 187.3849  |

Cuadro 10. Valores de concentración obtenida ICP-OES de las diferentes profundidades de plomo y arsénico

| Elemento | C en 20m | C en 50m | C en 100m | C en 300m |
|----------|----------|----------|-----------|-----------|
| Pb       | 13.45914 | 15.29468 | 15.88348  | 19.50369  |
|          | 15.19986 | 16.93917 | 16.42398  | 17.78434  |
|          | 16.22110 | 16.68761 | 16.05473  | 17.71656  |
|          | 15.96522 | 15.44034 | 16.01594  | 18.43547  |
|          | 14.48004 | 15.73786 | 16.70549  | 18.05920  |
|          | 13.71027 | 16.47757 | 15.92470  | 20.20860  |
|          | 16.31444 | 13.15087 | 16.61431  | 18.15051  |
|          | 15.33606 | 17.10776 | 16.07473  | 17.88280  |
|          | 13.75797 | 16.15676 | 16.47286  | 18.83612  |
|          | 14.57395 | 14.60183 | 16.81163  | 18.29526  |
|          | 15.44710 | 17.18378 | 15.65288  | 19.19995  |
|          | 14.69660 | 13.34690 | 15.44985  | 17.67554  |
|          | 14.42416 | 14.91331 | 16.00140  | 18.48839  |
|          | 16.06908 | 14.95534 | 15.94439  | 18.78749  |
|          | 15.04603 | 15.05184 | 16.57880  | 19.18893  |
|          | 14.10067 | 16.91604 | 16.68258  | 18.66946  |
|          | 15.87708 | 16.44981 | 16.22813  | 18.71966  |
|          | 16.44883 | 15.63847 | 16.98987  | 19.03823  |
|          | 13.61087 | 13.60424 | 16.60926  | 17.92908  |
|          | 15.55690 | 15.15495 | 16.38517  | 18.36831  |
| As       | 23.26652 | 23.47126 | 25.52571  | 31.23805  |
|          | 22.89999 | 23.66589 | 24.79959  | 30.55759  |
|          | 21.95000 | 23.83949 | 25.12947  | 28.52602  |
|          | 22.41412 | 23.79804 | 24.99419  | 29.67377  |
|          | 22.83917 | 24.34652 | 25.79435  | 29.26220  |
|          | 23.43703 | 23.73292 | 24.90050  | 29.07611  |
|          | 24.10349 | 23.76263 | 24.77699  | 30.28340  |
|          | 24.73858 | 24.53392 | 25.68187  | 28.31049  |
|          | 23.89161 | 23.68152 | 26.27722  | 29.12576  |
|          | 24.17446 | 23.48005 | 25.61065  | 28.42358  |
|          | 21.75240 | 23.33784 | 26.22305  | 28.80747  |
|          | 22.78377 | 22.40010 | 26.18035  | 28.87847  |
|          | 24.93013 | 23.30788 | 25.79833  | 28.15267  |
|          | 24.61774 | 23.52374 | 26.30705  | 29.48800  |
|          | 21.60320 | 24.05102 | 25.30674  | 30.86858  |
|          | 23.29792 | 24.17467 | 24.87794  | 29.24644  |
|          | 23.77683 | 23.36730 | 24.87249  | 30.93268  |
|          | 23.96266 | 23.43122 | 25.24426  | 30.76907  |
|          | 22.61030 | 23.46586 | 25.82260  | 29.56617  |
|          | 23.73376 | 24.36916 | 25.73589  | 28.96375  |

Cuadro 11. Valores de Intensidad de blancos y para la regresión lineal

| Elemento | I en 50 µg/L | I en 100µg/L | I en 200µg/L | I en 400µg/L | I en 500µg/L |
|----------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Pb       | 23.5180      | 46.014       | 84.12        | 157.831      | 198.523      |
|          | 25.1010      | 47.022       | 85.932       | 154.02       | 195.438      |
|          | 26.2840      | 45.993       | 83.442       | 156.117      | 199.11       |
|          | 22.7150      | 48.113       | 86.019       | 158.903      | 196.372      |
|          | 24.1822      | 42.943       | 84.396       | 151.998      | 197.264      |
| As       | 30.152       | 70.21        | 128.201      | 254.983      | 327.882      |
|          | 32.098       | 68.334       | 132.875      | 251.204      | 324.113      |
|          | 31.777       | 69.983       | 129.672      | 253.887      | 323.754      |
|          | 33.12        | 70.451       | 130.558      | 254.176      | 326.889      |
|          | 32.124       | 68.221       | 129.416      | 252.608      | 323.285      |

Los resultados del cuadro anterior se usaron para hacer las curvas de calibración de las figuras 1 y 2 en anexos (pág. 17).

Cuadro 12. Valores de intensidad de los blancos

| Numero | Intensidad de blancos |
|--------|-----------------------|
| 1      | 5.6123457             |
| 2      | 4.7239812             |
| 3      | 5.8654123             |
| 4      | 4.5810004             |
| 5      | 6.9342219             |
| 6      | 4.665789              |
| 7      | 4.9843001             |
| 8      | 5.4998765             |
| 9      | 5.0901204             |
| 10     | 3.9012349             |

Los resultados del cuadro anterior se usaron para hacer los cálculos de IOD y LOQ del Cuadro 9 en resultados (pág. 16).

Figura 5. Curva de calibración de plomo regresión lineal

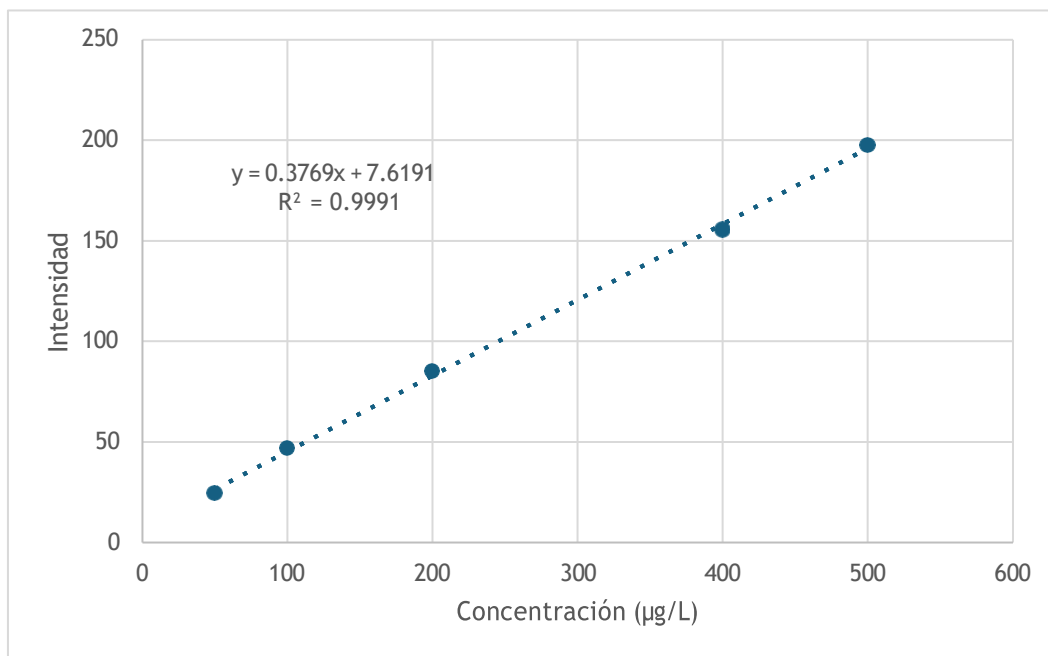
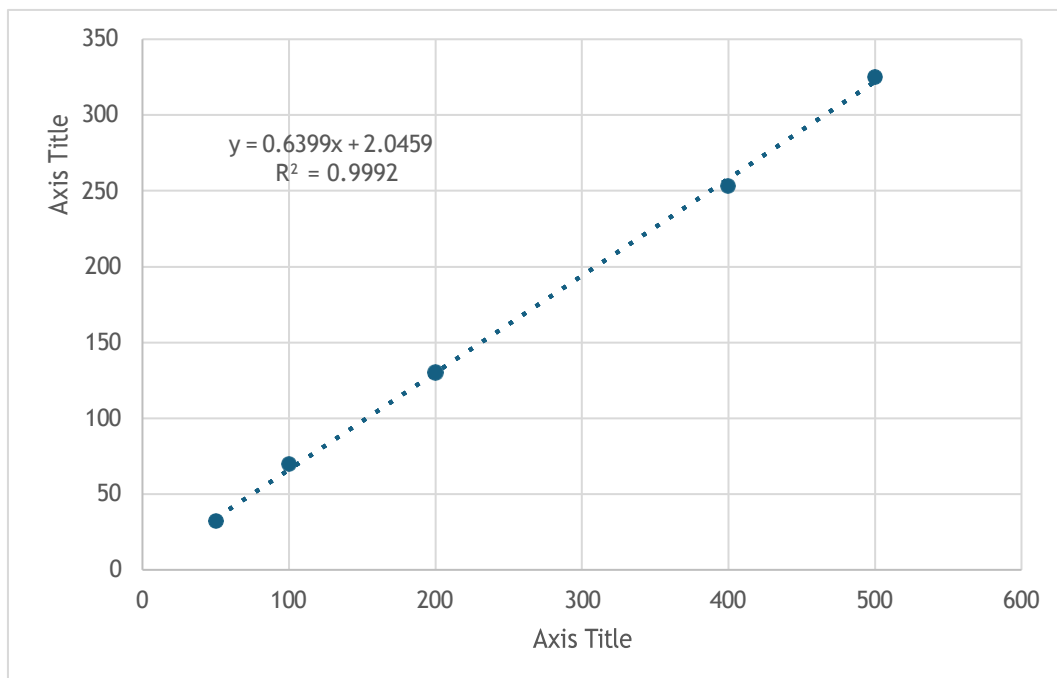


Figura 6. Curva de calibración de arsénico regresión lineal



Cuadro 13. Anova de un factor de las medias de plomo

| <i>F</i> | <i>P-value</i> | <i>F crit</i> |
|----------|----------------|---------------|
| 63.13    | 1.3776E-20     | 2.72494392    |

En el cuadro anterior muestra anova de un factor. Siendo **Hipótesis nula** ( $H_0$ ): Las medias de concentración en las 4 profundidades son iguales. **Hipótesis alternativa** ( $H_1$ ): Al menos una de las medias es diferente.  $P\text{-value} = 1.3776 \times 10^{-20} \rightarrow$  muy menor que 0.05.  $F\text{-obtenido} (63.13) > F\text{-crítico} (2.72) \rightarrow$  se rechaza la hipótesis nula.

Cuadro 14. Anova de un factor de las medias de Arsenico

| <i>F</i> | <i>P-value</i> | <i>F crit</i> |
|----------|----------------|---------------|
| 255.52   | 1.3332E-39     | 2.72494392    |

En el cuadro anterior muestra anova de un factor. Siendo **Hipótesis nula** ( $H_0$ ): Las medias de concentración en las 4 profundidades son iguales. **Hipótesis alternativa** ( $H_1$ ): Al menos una de las medias es diferente.  $P\text{-value} = 1.3776 \times 10^{-39} \rightarrow$  muy menor que 0.05.  $F\text{-obtenido} (255.52) > F\text{-crítico} (2.72) \rightarrow$  se rechaza la hipótesis nula.

Cuadro 15. Anova de un factor de las medias de plomo 20m y 50m

| <i>t</i> | <i>P-value</i> | <i>t crit</i> |
|----------|----------------|---------------|
| 1.498    | 0.143          | 2.02          |

En el cuadro anterior muestra Prueba t student. Siendo **Hipótesis nula** ( $H_0$ ): Las medias de concentración en las profundidades 20m y 50m no hay diferencia significativa. **Hipótesis alternativa** ( $H_1$ ): existe diferencia significativa.  $P\text{-value} = 0.14 \rightarrow$  es mayor que 0.05.  $t\text{-obtenido} (1.498) \leq t\text{-crítico} (2.02) \rightarrow$  se rechaza la hipótesis alternativa.

Cuadro 16. Anova de un factor de las medias de arsénico 20m y 50m

| <i>t</i> | <i>P-value</i> | <i>t crit</i> |
|----------|----------------|---------------|
| 1.3      | 0.20           | 2.02          |

En el cuadro anterior muestra anova de un factor. Siendo **Hipótesis nula** ( $H_0$ ): Las medias de concentración en las profundidades 20m y 50m no existe diferencia. **Hipótesis alternativa** ( $H_1$ ): existe diferencia.  $P\text{-value} = 0.16 \rightarrow$  es mayor que 0.05.  $t\text{-obtenido} (1.3) \leq t\text{-crítico} (4.10) \rightarrow$  se rechaza la hipótesis alternativa.

Cuadro 17. Prueba Post-hoc Tukey Test de las concentraciones de plomo

| <i>Treatments pair plomo</i> | <i>Q de tukey HSD</i> | <i>valor p</i> | <i>Inferencia de tukey</i> |
|------------------------------|-----------------------|----------------|----------------------------|
| 20m vs 50m                   | 2.6831                | 0.2378827      | <b>p&gt;0.05</b>           |
| 20m vs 100m                  | 6.4332                | 0.0010053      | p<0.01                     |
| 20m vs 300m                  | 18.0278               | 0.0010053      | p<0.01                     |
| 50m vs 100m                  | 3.7502                | 0.0470131      | p<0.05                     |
| 50m vs 300m                  | 15.3447               | 0.0010053      | p<0.01                     |
| 100m vs 300m                 | 11.5945               | 0.0010053      | p<0.01                     |

En el cuadro anterior muestra el análisis estadístico de turkey post-hoc de los resultados de las 4 muestras de concentración de plomo de cada profundidad. Los resultados de la prueba de Tukey HSD indican que la mayoría presentan diferencias significativas entre sí ( $p < 0.05$ ), especialmente en las comparaciones que involucran a 100m y 300m, donde las diferencias son altamente significativas ( $p < 0.01$ ). Sin embargo, no se encontró una diferencia significativa entre los tratamientos 20m y 50m ( $p = 0.2378$ ), lo que sugiere que estos dos grupos tienen comportamientos estadísticamente similares, mientras que los demás difieren en distintos niveles de magnitud.

Cuadro 18. Prueba Post/hoc Tukey Test de las concentraciones de arsénico

| <i>Treatments pair arsénico</i> | <i>Q de tukey HSD</i> | <i>valor p</i> | <i>Inferencia de tukey</i> |
|---------------------------------|-----------------------|----------------|----------------------------|
| 20m vs 50m                      | 2.0246                | 0.4844012      | <b>p&gt;0.05</b>           |
| 20m vs 100m                     | 12.5349               | 0.0010053      | p<0.01                     |
| 20m vs 300m                     | 35.8995               | 0.0010053      | p<0.01                     |
| 50m vs 100m                     | 10.5104               | 0.0010053      | p<0.01                     |
| 50m vs 300m                     | 33.875                | 0.0010053      | p<0.01                     |
| 100m vs 300m                    | 23.3646               | 0.0010053      | p<0.01                     |

En el cuadro anterior muestra el análisis estadístico de turkey post-hoc de los resultados de las 4 muestras de concentración de plomo de cada profundidad. Los resultados de la prueba de Tukey HSD para arsénico muestran que existe una diferencia significativa entre casi todos los pares de tratamientos ( $p < 0.01$ ), especialmente al comparar distancias mayores (100 m y 300 m) con las menores. Sin embargo, no se encontró una diferencia significativa entre 20 m y 50 m ( $p = 0.4844$ ), lo que indica que estos dos tratamientos presentan comportamientos similares, mientras que a mayores distancias las diferencias son claras y estadísticamente significativas.

Figura 7. Imagen de los espectros de la regresión lineal de Plomo

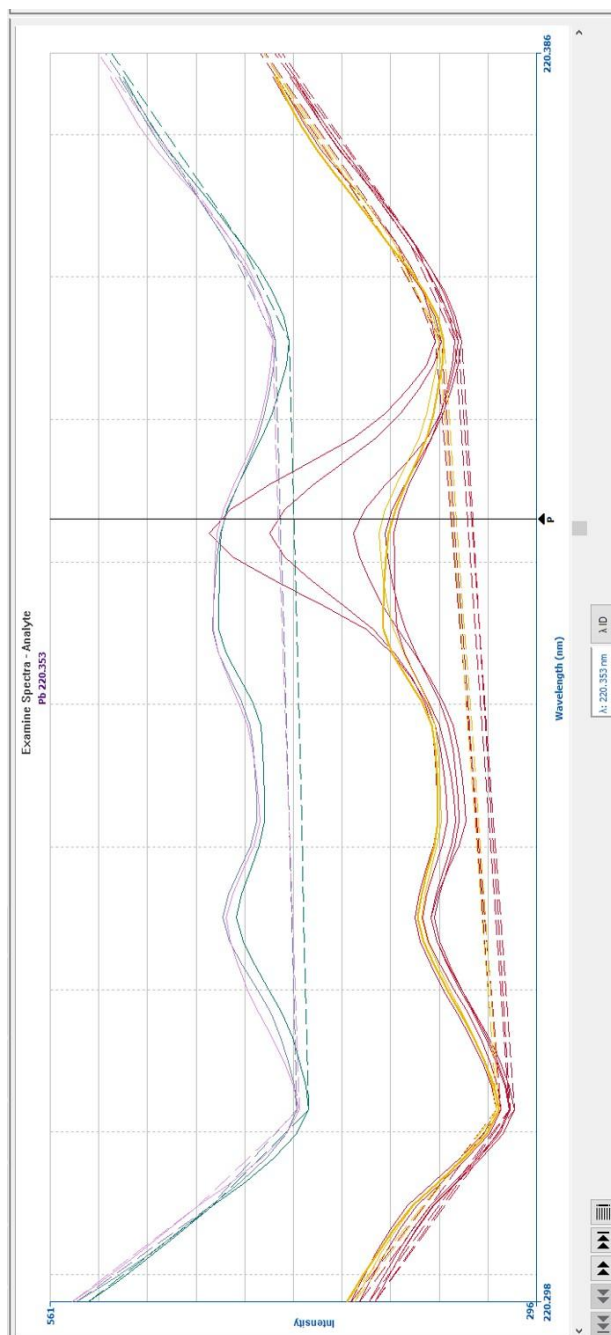


Figura 8. Imagen de los espectros de la regresión lineal de arsénico

