



Revista MINERVA

Plataforma digital de la revista: <https://minerva.sic.ues.edu.sv>

Artículo Científico | Scientific Article

Determinación de contaminación por metales pesados en muestras de agua superficial y de profundidad del lago de Ilopango, El Salvador

Determination of heavy metal contamination in surface and deep water samples from Lake Ilopango, El Salvador

Rafael Antonio Gómez Escoto^{1,2}, Marcos Tulio Orellana¹

1 Escuela de Física, Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas, Universidad de El Salvador

2 ORCID 0000-0002-8367-1349

RESUMEN

Este artículo describe los resultados de evaluar las concentraciones de metales pesados como el plomo, arsénico y cromo, en muestras de agua extraída de diferentes puntos del lago de Ilopango, en superficie y a 20 m de profundidad, y compararlas con normas de referencia para agua, con el objetivo de determinar el grado de contaminación presente en las muestras colectadas. Se trata de un monitoreo inicial con el propósito de establecer la posibilidad de potabilizar sus aguas para consumo humano. Los resultados se obtuvieron a través de la aplicación de la técnica de Fluorescencia de Rayos X por Reflexión Total (TXRF), que permite cuantificar concentraciones elementales con una sensibilidad de menos de una parte por millón en los casos óptimos, y un error máximo del 10% en la determinación de las

DOI:10.5377/revminerva.v8i1.20843

Enviado: 12 de febrero de 2025

Aceptado: 28 de julio de 2025

Palabras clave: Metales pesados, contaminantes, lago de Ilopango, calidad del agua, fluorescencia de rayos-X.

Keywords: Heavy metals, pollutants, Ilopango lake, water quality, X-ray fluorescence.



Este contenido está protegido bajo la licencia CC BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

concentraciones. Además, se determinó geográficamente el gradiente de las concentraciones de los metales pesados Cr, As y Pb presentes en el lago, aplicando QGIS y el método de primeros vecinos. Los resultados iniciales indican una fuerte contaminación por Arsénico y Plomo, de hasta 27 y 38 veces mayor, respectivamente, que el límite establecido en el valor guía de la norma, además de algunos parámetros físico-químicos fuera de los límites aceptables, por lo que la potabilización del agua de lago con métodos convencionales, no parece recomendable.

ABSTRACT

This article describes the results of evaluating the concentrations of heavy metals such as Lead, Arsenic and Chromium, in water samples extracted from different points of Ilopango lake, on the surface and at a depth of 20 m, and comparing them with reference standards for water, in order to determine the degree of contamination present in the collected samples. It is an initial monitoring that will establish the possibility of making its water adequate for human consumption and other uses. The results were obtained through the application of the Total Reflection X-ray Fluorescence (TXRF) technique, which allows to quantify elemental concentrations with a sensitivity of less than one part per million in optimal cases, and a maximum error of 10 % in determining concentrations. In addition, the gradient of the concentrations of heavy metals as Cr, As and Pb present in the lake, was geographically determined, applying QGIS and the first neighbor's method. The initial results indicate a strong contamination by Arsenic and Lead, up to 27 and 38 times higher, respectively, than the limit established in the guide value of the code, in addition to some physical-chemical parameters outside of acceptable limits, so that the purification of lake water with conventional methods is not recommended.

INTRODUCCIÓN

El lago de Ilopango es de origen volcánico mide 8 km x 11 km, tiene una superficie de 72 km² y una profundidad máxima de 230 m (*Escalante y Rivas, 2014*), lo que lo convierte en el lago más grande de El Salvador. El lago provee de diferentes servicios como la recarga de acuíferos y el almacenamiento de agua, control de inundaciones, producción pesquera, turismo y recreación (*Arévalo y Castañeda, 2012*). Actualmente, la cobertura vegetal de la cuenca, está

alterada debido a la enorme actividad humana que ejerce presión sobre este recurso, como la agricultura con agroquímicos, que lo contaminan por escorrentía, así como la actividad industrial en el entorno del lago. Otros elementos que influyen en el estado actual del lago, es el desarrollo de complejos turísticos y habitacionales muy cercanos (*Escalante y Rivas, 2014*). La Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA), institución estatal encargada de la explotación de acuíferos y distribución de agua potable, y que ha iniciado la potabilización del lago de Ilopango, colectó datos de algunos elementos químicos contaminantes en los últimos años, pero no ha hecho públicos los resultados de esta y otras investigaciones que ayuden a evaluar el impacto negativo de la contaminación de este recurso (*Pérez y Litter, 2008*).

En 2008 se publicaron resultados de la presencia de algunos metales en el lago de Ilopango, lago de Coatepeque y la laguna de Olomega, también en El Salvador, los resultados revelan la presencia de arsénico en la mayoría de estos cuerpos de agua (*Pérez y Litter, 2008*), y (*López et al. 2009*), generada presumiblemente, por la interacción con fluidos orgánicos hidrotermales, debido a la naturaleza volcánica de la región.

La investigación referida explica que los valores encontrados superan los 0.05 mg/L, el máximo permitido para el As por el Reglamento UE-(2016) y 0.01 mg/L por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) y la Organización Mundial de la Salud (OMS). Es preocupante que los habitantes en las cercanías del lago se sirvan directamente de sus aguas para uso doméstico, agricultura, pesca y acuicultura.

Para la determinación de las concentraciones de los elementos en muestras de agua se emplea la técnica de Fluorescencia de Rayos X por Reflexión Total TXRF (*Stonach, 2005*), a través del análisis espectral de las muestras de agua, que relaciona el área de la curva definida por el número de cuentas para un valor de energía de la línea de emisión característica de un elemento específico, con el valor de concentración de un elemento conocido como

“estándar interno” (Ruiz, 2010). Para establecer los niveles de contaminación con base en los diferentes elementos identificados se emplea el Reglamento (UE) 2016, así como los límites establecidos por la norma salvadoreña para la calidad del agua (NSO 13.07.01;08), que establecen las concentraciones permisibles para el desarrollo de actividades como el consumo humano, uso agrícola, uso pecuario y estuarios. También se determinaron los metales pesados con mayor concentración en las muestras y se determinó el gradiente de las concentraciones de dichos metales pesados con la ayuda de Quantum GIS por análisis de los vecinos más próximos, como una figura para obtener una comprensión inicial del posible estado de los gradientes de concentración, al momento del muestreo.

METODOLOGÍA

Localización y recolección de muestras

Las muestras se colectaron por muestreo simple en ocho puntos del Lago de Ilopango previamente determinados y localizados con GPS (Tabla 1 y Figura 1), para mapear su ubicación geográfica, empleando QGIS. El criterio de inclusión fue un muestreo de la evaluación de calidad de agua en el Lago de Ilopango en 2015 (Mena, 2015).

El levantamiento de las muestras se realizó por las mañanas, para cada uno los ocho puntos determinados, tanto en superficie como a 20 m de profundidad, empleando un muestreador de profundidad tipo Van Dorn, de 5 litros. Las muestras se recolectaron en botellas de 500 ml de polietileno, y fueron preservadas con ácido nítrico (HNO₃) con un pH aproximado de 2 (INECC-CCA, 2010). Luego de recolectar las muestras, se almacenaron a una temperatura cercana a 4°C, hasta ser llevadas al laboratorio para el procedimiento analítico. Se realizaron dos campañas, la primera en época seca, en el mes de abril de 2022, y la segunda en época lluviosa, durante el mes septiembre del mismo año.

Pretratamiento de las muestras

Se prepararon 3 analitos de cada muestra, tomando 1 ml de cada una y depositándolo en un vial de 10 ml. Se le agregó 5µL de Galio (estándar interno, en

concentración de 100 mg/L), y posteriormente se depositaron 10 µL de las muestras de agua de cada vial, sobre un reflector acrílico, listo para el análisis.

Procedimiento analítico

Las muestras se analizaron en el laboratorio de Fluorescencia de Rayos X de la escuela de Física, de la Universidad de El Salvador, mediante la técnica de Fluorescencia de Rayos X por Reflexión Total (S2-PICOFOX) para determinar los metales pesados en la solución. La fuente de rayos X, genera una potencia máxima de 50 W y un detector semiconductor que funciona según el principio de deriva de silicio (SDD) con una resolución <160eV, captura la radiación fluorescente proveniente del analito. Las

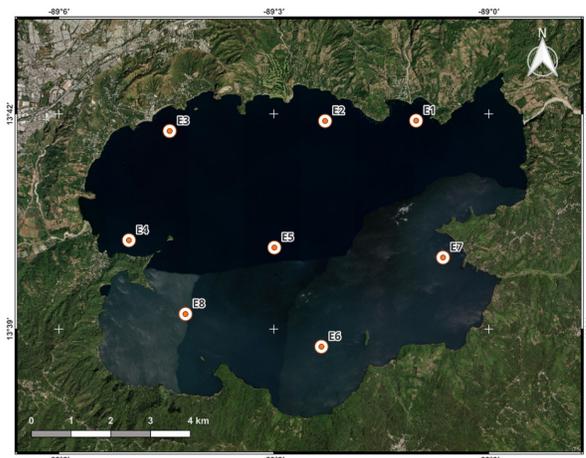
Tabla 1

Puntos de recolección de muestras

Estaciones	Próximo a:	Coord. N	Coord. W
E1	Comunidad San Agustín	13°41'54.4"	89°01'0.8"
E2	Corrales de Peces	13°41'54.1"	89°02'17"
E3	Turicentro Apulo	13°41'45.7"	89°04'27.2"
E4	Desembocadura Río Chagüite y Joya Grande	13°40'14.3"	89°05'1.3"
E5	Cerros Quemados	13°40'8.2"	89°02'59.5"
E6	San Juan Tepezontes	13°38'45.3"	89°02'20.1"
E7	Desagüe del Lago al Río Jiboa	13°39'59.9"	89°00'38.3"
E8	Santiago Texacuangos	13°39'12.6"	89°04'13.9"

Figura 1

Sitios de muestreo en el lago de Ilopango, siguiendo estaciones de muestreo sugeridas por Zulma Mena (2015)



señales pasan por una fase de preamplificación y amplificación, para derivarlas posteriormente a un analizador multicanal, que separa los pulsos en canales de energía, generando el espectro de Fluorescencia típico.

Análisis cualitativo

Se obtuvieron los espectros usados para la determinación cualitativa de los elementos presentes en la muestra, identificables por arriba del límite de sensibilidad del equipo. Dichos espectros fueron exportados al programa AXIL en formato .ASC para luego ser convertidos al formato de análisis SPE que es el formato que necesita AXIL; los archivos con formato SPE necesitan ser precalibrados y para ello se identifican las líneas de emisión de elementos como el arsénico y el molibdeno, la K del molibdeno que proviene del tubo de rayos X y K del arsénico que por lo regular casi siempre está presente en agua. Se hace un ajuste del espectro que genera un archivo con extensión ASR, que contiene toda la información estadística y física de las líneas características que se detectaron en cada espectro.

El valor del área bajo la curva del pico ajustado con la deconvolución Gaussiana para cada línea de cada elemento analizado, debe ser positivo y mayor a 3 veces el valor de la desviación estándar, para una identificación cualitativa de cada elemento. El valor individual de Chi Cuadrado generado en la estadística del proceso de ajuste Gaussiano debe ser menor a 10 (idealmente 3, para garantizar el mejor ajuste).

En general, las áreas de los picos que resultaron negativos no fueron tomadas en cuenta para la cuantificación (Figura 2).

Análisis cuantitativo

Utilizando el programa AXIL, del Organismo Internacional de Energía Atómica, OIEA, por el método de regresión de tasas de recuento versus concentraciones, se obtiene un archivo con extensión ARP, que calcula la concentración de cada elemento de interés en ppm que para muestras de agua es equivalente a mg/L, partiendo de la consideración que la intensidad de cada línea de emisión fluorescente, es directamente proporcional a la

concentración del elemento presente en el analito, con las correspondientes correcciones por efectos de dispersión y sensibilidad, según el algoritmo en 1 (Bruker Nano, 2013).

$$S_i = \frac{Ni \cdot C_{Ga}}{N_{Ga} \cdot C_i}$$

Donde:

- Ni : Cuentas netas de la línea fluorescente (cuentas por segundo) del elemento i
- Ni : Cuentas netas de la línea fluorescente del Ga
- C_i : Concentración del elemento i en la muestra
- C_{Ga} : Concentración del Ga en la muestra
- S_i : Factor de sensibilidad del elemento S_i , con la concentración C_i

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la mayoría de espectros analizados (Tablas 2 - 6), se pudieron identificar elementos reconocidos como metales pesados por presentar una densidad superior a 5 g/cm^3 (Ali H. y Khan E., 2018), incluyendo cromo (Cr), manganeso (Nb), níquel (Ni), cobre (Cu), zinc (Zn), arsénico (As), cadmio (Cd), plomo (Pb), y otros, como se puede ver en Figura 2. El Galio (Ga) fue incorporado como estándar interno a los analitos de estudio.

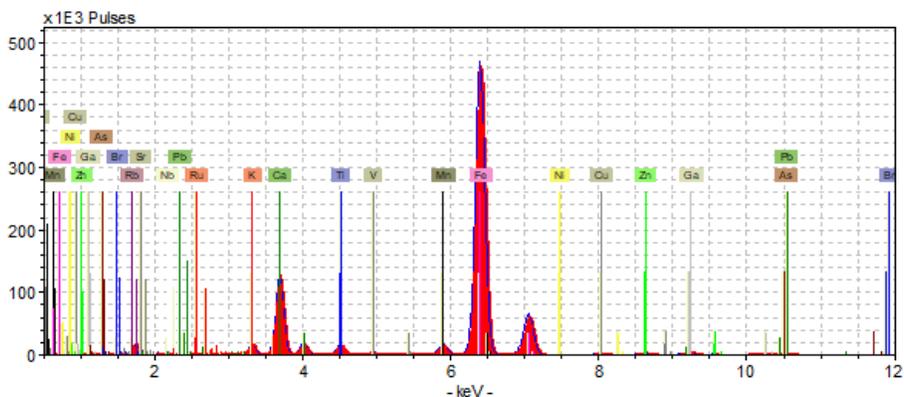
Tabla 2

Valores medidos de los diferentes elementos de estudio, obtenidos en la primera campaña en muestras de superficie mg/L (abril - 2022).

Estación	Cr	As	Pb
	(Límite NSO: 0.05 mg/L)	(Límite NSO: 0.01 mg/L)	(Límite NSO: 0.01 mg/L)
E1	21±2	2.2±0.2	3.1±0.2
E2	17±2	1.8±0.2	2.4±0.2
E3	9.6±0.8	1.9±0.2	2.3±0.3
E4	7.2±0.7	1.7±0.2	2.3±0.2
E5	13±1	1.6±0.1	2.3±0.2
E6	25±2	1.6±0.1	2.2±0.2
E7	17±2	1.4±0.1	1.9±0.2
E8	15±1	2.1±0.2	2.9±0.2

Figura 2

Espectro de energías típico de las muestras de agua analizadas, que permite la identificación cualitativa de algunos de los elementos presentes.



Los valores de concentración para arsénico en la campaña 1, presentan un mínimo de 1.4 mg/L y un máximo de 3.0 mg/L, mientras que para el plomo se registra un valor mínimo de 1.9 mg/L y un máximo de 4.9 mg/L, siendo el valor límite de 0.01 mg/L para el arsénico y para el plomo, en cuanto al consumo humano se refiere. Es decir, el mínimo del arsénico supera 27 veces el valor guía para consumo humano, mientras el mínimo del plomo, lo supera en 38 veces. El valor límite para cromo según la norma salvadoreña NSO es de 0.05 mg/L, mientras el mínimo valor encontrado fue de 9.6 mg/L (Tablas 2 y 3).

Las concentraciones mínimas y máximas en el caso del cromo fueron de 5.9 mg/L y de 24 mg/L,

Tabla 3

Valores medidos de los diferentes elementos de estudio, obtenidos en la primera campaña en muestras de profundidad mg/L (abril - 2022).

Estación	Cr (Límite NSO: 0.05 mg/L)	As (Límite NSO: 0.01 mg/L)	Pb (Límite NSO: 0.01 mg/L)
E1	22±2	1.9±0.7	3.2±0.3
E2	23±2	3.0±0.2	4.9±0.4
E3	20±2	2.0±0.2	2.9±0.2
E4	27±3	3.0±0.3	3.8±0.3
E5	21±2	2.7±0.2	3.5±0.2
E6	18±2	2.4±0.2	3.4±0.3
E7	23±2	2.2±0.2	2.6±0.2
E8	26±3	2.4±0.2	3.4±0.2

Tabla 4

Valores medidos de los diferentes elementos de estudio, obtenidos en la segunda campaña en muestras de superficie mg/L (septiembre - 2022).

Estación	Cr (Límite NSO: 0.05 mg/L)	As (Límite NSO: 0.01 mg/L)	Pb (Límite NSO: 0.01 mg/L)
E1	4.1±0.6	0.9±0.1	0.8±0.1
E2	18±1	2.2±0.2	3.3±0.3
E3	12±1	3.2±0.3	4.0±0.3
E4	10.0±0.9	2.0±0.2	3.1±0.3
E5	9.7±0.8	0.8±0.1	2.3±0.4
E6	12±1	2.1±0.2	2.5±0.2
E7	3.7±0.5	1.0±0.2	2.1±0.2
E8	23±2	2.3±0.1	3.0±0.2

Tabla 5

Valores medidos de los diferentes elementos de estudio, obtenidos en la segunda campaña en muestras de profundidad mg/L (septiembre - 2022).

Estación	Cr (Límite NSO: 0.05 mg/L)	As (Límite NSO: 0.01 mg/L)	Pb (Límite NSO: 0.01 mg/L)
E1	24±3	2.2±0.2	2.5±0.2
E2	21±2	2.1±0.2	2.6±0.3
E3	21±2	2.2±0.2	2.4±0.2
E4	5.9±0.6	1.6±0.2	2.1±0.2
E5	23±2	1.7±0.2	2.4±0.2
E6	24±2	2.5±0.2	2.7±0.3
E7	19±1	2.3±0.2	2.1±0.2
E8	20±2	2.2±0.2	2.6±0.2

Tabla 6

Límites máximos permisibles de concentración de metales pesados en agua (mg/L) (Codex, 1995; UE, 2016).

Uso/Metal pesado	As (mg/L)	Pb (mg/L)
Consumo humano	0.0500	0.0500
Agua Marina y de estuarios	0.0500	0.0100
Agua de uso agrícola	0.1000	0.0500
Agua de uso pecuario	0.2000	0.0500

respectivamente. Para el arsénico se observó un mínimo de 1.6 mg/L y un máximo de 2.5 mg/L, mientras que en el caso del plomo estos valores fueron de 2.1 mg/L y de 2.7 mg/L, respectivamente, superando por mucho el valor de 0.01 mg/L establecido como valor límite en la norma salvadoreña NSO para agua potable, para ambos metales (Tablas 3 y 5).

En cada estación de recolección de las muestras, se midieron los parámetros físico-químicos, encontrando que el lago de Ilopango presenta condiciones alcalinas cuyos valores de pH oscilan entre los 8.3 y 8.5 (Tabla 7). Al momento del muestreo, los valores de oxígenos disueltos variaron entre 6.1 a 7.8 mg/L, lo que representa condiciones aceptables para la vida acuática. La conductividad eléctrica varió entre 1887 y 1987 uS/cm, lo que indica un alto contenido de sales disueltas, y puede ser ocasionado por el ingreso de aguas termales y escorrentías. Los

Tabla 7

Muestreo de calidad del agua con sonda multiparámetro (Parámetros Físico-Químicos) (2da campaña).

Estación	pH	ORP	DO (mg/L)	EC (uS/cm)	TDS (mg/L)	SAL (ppt)
E1	8,51 ± 0,01	142 ± 19	7 ± 1	1981 ± 22	1287 ± 14	0,98 ± 0,03
E2	8,49 ± 0,01	153 ± 15	6,1 ± 0,3	1987 ± 5	1291 ± 4	0,98 ± 0,01
E3	8,3 ± 0,6	146 ± 13	7 ± 1	2091 ± 41	1359 ± 26	1,06 ± 0,02
E4	8,4 ± 0,7	149 ± 11	7,1 ± 0,3	2010 ± 24	1345 ± 21	1,03 ± 0,02
E5	8,43 ± 0,04	185 ± 15	7,8 ± 0,6	1887 ± 7	1226 ± 4	0,93 ± 0,01
E6	8,5 ± 0,1	173 ± 12	7,7 ± 0,5	1976 ± 10	1284 ± 7	0,97 ± 0,01
E7	8,4 ± 0,5	154 ± 17	7,4 ± 0,7	1983 ± 26	1288 ± 16	0,98 ± 0,02
E8	8,49 ± 0,01	173 ± 17	7,8 ± 1,1	1980 ± 21	1286 ± 13	0,98 ± 0,01
Promedio	8,44	159,38	7,24	1986,88	1295,75	0,99

valores de sólidos disueltos al momento del muestreo varían entre 1226 y 1359 mg/L siendo el valor máximo de 500 mg/L, mientras que la salinidad supera el valor de 0,5 ppt establecido en la norma.

Gradientes de concentraciones de metales pesados (As, Pb y Cr)

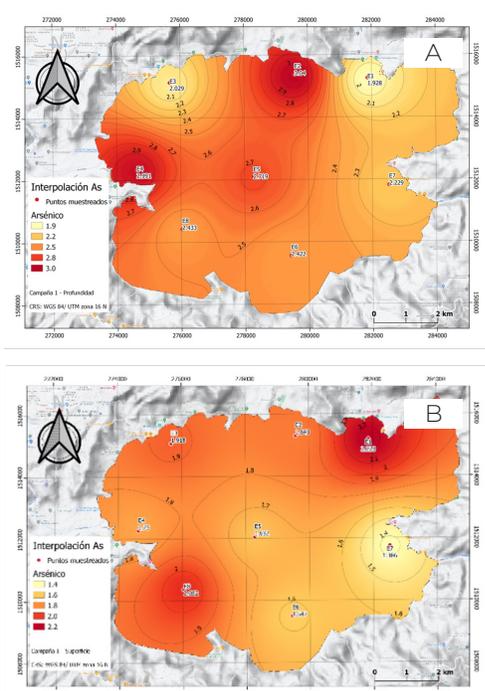
A continuación, se presentan los gradientes de las concentraciones por metales pesados de As y Pb producto de las interpolaciones en QGIS por método de los vecinos más próximos, asumiendo que el cuerpo de agua del lago se mantiene en condiciones estáticas, lo cual obviamente no corresponde a la realidad, pues las corrientes superficiales y profundas, están trasladando continuamente partículas y sustancias disueltas, sin embargo, resulta útil para comprender la distribución aproximada de los contaminantes identificados, y las zonas calientes, de mayor contaminación.

En la Figura 3 se observa los gradientes de las concentraciones del arsénico en las 8 estaciones de muestreo, siendo la Figura 3A el mapa de las concentraciones de arsénico de la campaña 1 (época seca) con los datos recolectados en superficie, la Figura 3B para la campaña 2 de superficie (época lluviosa).

El gradiente en superficie del arsénico para las campañas 1 y 2 se comporta de forma que parece incrementar el valor de las concentraciones de Este a Oeste, siendo las zonas más oscuras las que contienen

Figura 3

Gradientes de concentraciones de Arsénico de las campañas 1 (A) y Campaña 2 (B), al momento del muestreo.



mayor concentración de arsénico seguidas por una reducción de las concentraciones en color claro. Los valores de las concentraciones resultan ligeramente más elevadas en la época seca (Figura 3A), con relación a la época lluviosa (Figura 3B).

La Figura 4 corresponde a los mapas de los gradientes de las concentraciones de plomo de la campaña 1 y 2, a 20 metros de profundidad.

En muestras de profundidad, para la campaña 1 se observa mayor concentración de plomo en la zona Norte, frente a Corral de Peces, mientras que en la campaña 2 se encuentran mayores niveles de concentración de Pb en la zona sur del lago, que corresponde al área frente a San Miguel Tepezontes.

Los niveles de contaminación por cromo (Figura 5) en superficie en ambas campañas, es máximo en la zona frente a Santiago Texacuangos, siendo las concentraciones medidas en la campaña 2, en general, superiores a las medidas en muestras obtenidas en la campaña 1. Todas las concentraciones medidas, resultaron superiores al límite máximo de

Figura 4

Gradientes de concentraciones de Plomo, de las campañas 1 (A) y Campaña 2 (B), proyectadas al momento del muestreo.

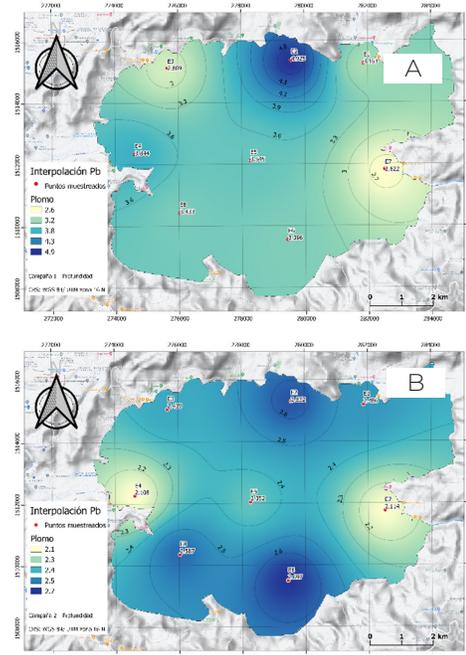
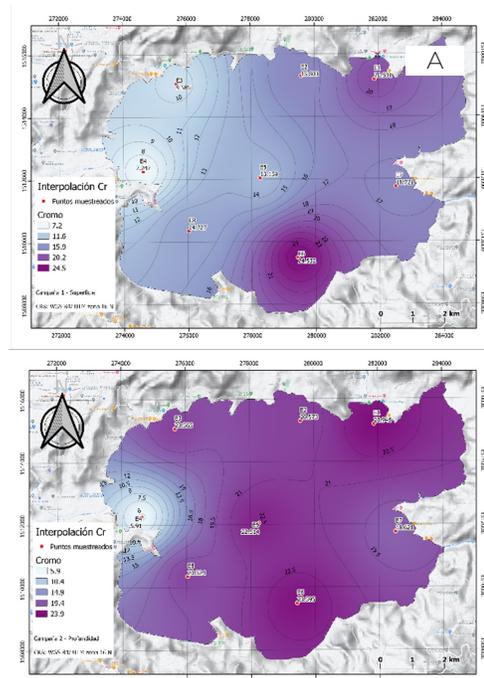


Figura 5

Gradientes de concentración del Cromo para muestras de superficie, de las campañas 1 (A) y Campaña 2 (B), proyectadas al momento del muestreo.



0.05 mg/L establecidos en la Norma Salvadoreña del Agua, NSO.

CONCLUSIONES

En cuanto a la metodología empleada, Espinosa (2025) evaluó en su tesis de maestría, la aplicabilidad de la técnica de fluorescencia de rayos X por reflexión total (TXRF) para la determinación de metales pesados en aguas naturales en Panamá, con énfasis en su uso para procesos de potabilización. El estudio analizó muestras de fuentes superficiales utilizando TXRF sin requerir digestión previa ni reactivos complejos, lo que reduce el costo y tiempo del análisis, exactamente como se procedió en este estudio. La autora concluye que el TXRF es una técnica eficaz y aplicable en contextos de monitoreo rutinario que requieren confiabilidad en las medidas, todo lo cual se corroboró en el presente estudio. En consecuencia, la implementación de técnicas de análisis como TXRF podría fortalecer las capacidades nacionales de vigilancia sanitaria y ambiental, particularmente en la determinación de metales pesados en muestras ambientales, permitiendo diagnósticos más rápidos y con menores costos operativos.

Las determinaciones de metales pesados realizadas en las muestras de agua del lago de Ilopango, tanto de superficie como de profundidad, indican elevados niveles de concentración para el Arsénico, Plomo y Cromo, lo cual debería ser motivo de alarma, por cuanto los niveles de contaminación por estos tres metales, resultan varias veces mayores que los valores guía establecido por el Codex UE, para diferentes usos del agua, así como en la norma salvadoreña NSO para agua de consumo humano.

Particularmente, es posible concluir que, la calidad del agua del lago de Ilopango no es adecuada para su potabilización por métodos convencionales, debido a las altas concentraciones de los tres metales pesados identificados, ya que superan por mucho, el 0.01mg/L en el caso del Plomo y Arsénico, y de 0.05 mg/L para el Cromo, que han sido establecidos como valor límite para agua de consumo humano en la norma salvadoreña NSO (Tablas 3 - 6).

La calidad del agua tampoco es adecuada para uso agrícola o pecuario, ya que los valores encontrados

superan también los límites establecidos de 0.1mg/L para el arsénico y 0.05mg/L para el plomo, de acuerdo al Codex Alimentarius de la FAO.

Además, se observa que en todos los puntos de recolección ya sea de superficie o a 20 metros de profundidad, los altos niveles de contaminación se reiteran en ambas campañas, dejando claro que el agua no es apta para ser utilizada como agua cruda a ser tratada por métodos convencionales, debido también a la presencia de concentraciones muy por encima de los valores guías para sólidos disueltos.

Los parámetros físico-químicos medidos durante los muestreos, indican un pH promedio de 8,44 y valores de oxígeno disuelto (DO promedio: 7,24 mg/L), que presentan condiciones aceptables para la vida acuática, sin embargo, los valores de sólidos totales disueltos encontrados (TDS promedio: 1295.75 mg/L), y de salinidad (0.99 ppt), son relativamente elevados, y es previsible que el consumo del agua podría ocasionar efectos laxantes en personas y animales.

Para potabilizar el agua contaminada por metales pesados es posible utilizar métodos fotocatalíticos, o bien, materiales biosorbentes, dicho uso ha sido demostrado en un estudio referente a la adsorción de metales pesados en aguas residuales, empleando materiales de origen biológico de acuerdo a Tejada -Tovar et al., (2015).

El problema es mayor de lo que se piensa ya que en el lago se practica la crianza de peces, y según algunos estudios, los peces presentan una alta capacidad de bioacumular cadmio, arsénico, cromo y mercurio, así como por la intensa y variada actividad humana, en las aguas del lago y sus riveras.

REFERENCIAS

Ali H. y Khan E. (2018). *Heavy metal(loid) bioaccumulation in fish and its implications for human health. Environmental Reviews*, 26(3), 287–302

Arévalo Pérez, C., Castañeda Pineda, K. (2012). Investigación de la presencia de litio por fotometría de llama en muestras de agua provenientes de la zona noroeste de la Isla Chachagaste del lago de Ilopango. Tesis de Licenciatura en

- Química y Farmacia. Universidad de El Salvador.
- Bruker Nano, (2013). Sample types and preparation for TXRF: S2 Picofox technical note. Bruker Nano GmbH.
- CODEX (1995). Norma general para los contaminantes y las toxinas presentes en los alimentos y piensos. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Dirección General del Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales, (2022) Gerencia de Hidrología Calidad de Agua del Lago de Ilopango. Ministerio del Medio Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador. Recuperado de: https://transparencia.gob.sv/descarga_archivo.php?id=NTMzODUx
- Escalante Arévalo, S., Rivas García, E. (2014). Determinación de la presencia de cromo hexavalente en muestras de agua del lago de Ilopango por el método de absorción atómica. Tesis de Licenciatura en Química y Farmacia. Universidad de El Salvador.
- Espinosa, Y. (2025). *Evaluación de la técnica de fluorescencia de rayos X total (TXRF) para determinar metales pesados en aguas naturales con fines de potabilización* (Tesis de Maestría). Universidad de Panamá. Recuperado de https://uprid.up.ac.pa/8968/1/yahaira_espinosa.pdf
- INECC-CCA (2010). Manual de métodos de muestreo y preservación de muestras de las sustancias prioritarias para las matrices del PRONAME: México, p. 55.
- López, D. L., Ransom, L., Monterrosa, J., Soriano, T., Barahona, F., Olmos, R., Bundschuh, J. (2009). "Volcanic pollution of arsenic and boron at Ilopango Lake, El Salvador". *Natural arsenic in groundwaters of Latin America*. A.A. Balkema. Taylor and Francis, pp. 129-143.
- Mena, Z. (2015). Evaluación de la calidad del agua, lago de Ilopango. Dirección General del Observatorio Ambiental, El Salvador.
- Pérez, A., Litter, M. I. (2008). Distribución del arsénico en las regiones Ibéricas e Iberoamericana. CYTED.
- Ruiz, R. F. (2010). Fluorescencia de rayos x por reflexión total (txrf): Una gran desconocida. An. Quím. Real Sociedad Española de Química, 106(1), 05-12.
- Stonach, H. (2005). Environmental trace-element analysis using a benchtop total reflection x-ray fluorescence spectrometer. Analytical. Universidad de El Salvador.
- Tejada-Tovar, C., Villabona-Ortiz, Á., & Garcés-Jaraba, L. (2015). Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico. *Tecnológicas*, 18(34), 109. <https://doi.org/10.22430/22565337.209>
- Vera, L., Uguña, M. F. (2015). Eliminación de los metales pesados de las aguas residuales mineras utilizando el bagazo de caña como biosorbente. Centro de Estudios Ambientales de la Universidad de Cuenca, Ecuador.