

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE POSGRADO



ESTUDIO DE METALES PESADOS EN LA CUENCA DEL
LAGO DE COATEPEQUE,
DEPARTAMENTO DE SANTA ANA

PRESENTADO POR:

MIGUEL ANTONIO BEZA ESTRADA
MÉLIDA ESTEFANÍA PEÑATE GENOVÉS

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

MAESTRO(A) EN GESTIÓN DE RECURSOS HIDROGEOLÓGICOS

CIUDAD UNIVERSITARIA, DICIEMBRE 2025

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

MSc. JUAN ROSA QUINTANILLA

SECRETARIO GENERAL:

LICDO. PEDRO ROSALÍO ESCOBAR CASTANEDA

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO:

MSc. LUIS SALVADOR BARRERA MANCÍA

SECRETARIO:

ARQ. RAÚL ALEXANDER FABIÁN ORELLANA

ESCUELA DE POSGRADO

DIRECTOR:

MSc. ELMER ARTURO CARBALLO RUÍZ

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE POSGRADO

Trabajo de graduación previo a la opción al grado de:

MAESTRO(A) EN GESTIÓN DE RECURSOS HIDROGEOLOGÍCOS

Título:

**ESTUDIO DE METALES PESADOS EN LA CUENCA DEL
LAGO DE COATEPEQUE,
DEPARTAMENTO DE SANTA ANA**

Presentado por:

MIGUEL ANTONIO BEZA ESTRADA
MÉLIDA ESTEFANÍA PEÑATE GENOVÉS

Trabajo de graduación aprobado por:

Docente asesor:

DRA. TANIA TORRES RIVERA

SAN SALVADOR, DICIEMBRE DE 2025

Trabajo de graduación aprobado por:

Docente asesor:

DRA. TANIA TORRES RIVERA

RESUMEN

El estudio tuvo como objetivo caracterizar la presencia y concentración de metales pesados en aguas subterráneas y superficiales de la cuenca del lago de Coatepeque, El Salvador, con el fin de evaluar su calidad y aptitud para distintos usos. La investigación se enmarcó en un enfoque cuantitativo y descriptivo, con énfasis en el análisis directo de nueve puntos de agua subterránea y la comparación con datos secundarios de ocho puntos de agua superficial obtenidos de informes oficiales.

Se aplicaron métodos de campo para la medición in situ de parámetros fisicoquímicos, técnicas de laboratorio para la determinación de metales pesados mediante métodos estándar (SMWW), y herramientas estadísticas y geoespaciales para el análisis de resultados. La calidad del agua se evaluó utilizando el Índice Canadiense de Calidad del Agua (CCME WQI), complementado con referencias normativas nacionales e internacionales.

Los resultados indicaron la presencia sistemática de arsénico y boro en concentraciones superiores a los valores guía en varios puntos, con un comportamiento espacial asociado a zonas de mayor mineralización y conductividad eléctrica. El índice CCME WQI clasificó la calidad del agua subterránea como marginal o regular bajo un enfoque restrictivo, y como razonable bajo un enfoque permisivo. Metales como mercurio fueron detectados en niveles bajos, pero relevantes por su toxicidad.

Se concluyó que la calidad del agua subterránea en la cuenca presenta condiciones heterogéneas, con elementos que pueden restringir su uso para consumo humano sin tratamiento, pero con mayor aptitud para usos agrícolas o recreativos. El estudio genera una línea base técnica que puede ser utilizada para futuras investigaciones, monitoreos y decisiones de gestión ambiental en la región.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo brindado por las personas e instituciones que hicieron posible la realización de este trabajo de investigación, tanto en su dimensión académica como operativa.

A la **Dra. Tania Torres Rivera**, por su acompañamiento riguroso como docente asesora y por el apoyo brindado durante el desarrollo del trabajo y del programa de estudios.

Al **Proyecto Agua Futura**, impulsado por instituciones italianas como el **Istituto di Geoscienze e Georisorse (IGG-CNR)**, el **Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR/ICCOM)**, el **Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV)**, la **Università degli Studi di Firenze**, la **Università di Roma “La Sapienza”**, la organización **ISCOS (CISL)**, la fundación **ACRA** y otros socios académicos y técnicos, por haber desarrollado el programa de maestría y otorgado la beca de estudios correspondiente.

A la **Universidad de El Salvador**, por su labor institucional como sede académica del programa y por el respaldo brindado a lo largo del proceso formativo.

A la **Fundación Coatepeque**, por su apoyo logístico en territorio y las gestiones que permitieron la realización del trabajo de campo en la cuenca.

A las comunidades de la **cuenca del lago de Coatepeque**, por su disposición a colaborar con el estudio, permitiendo el acceso a fuentes de agua e información clave para la investigación.

Al **Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN)**, por facilitar el acceso al laboratorio de calidad del agua y colaborar en los análisis técnicos de las muestras recolectadas.

Al **Ing. Douglas Ernesto García Sarmiento**, por su apoyo logístico y profesional durante el desarrollo de la investigación en campo.

TABLA DE CONTENIDOS

ESTUDIO DE METALES PESADOS EN LA CUENCA DEL LAGO DE COATEPEQUE, DEPARTAMENTO	i
DE SANTA ANA	i
RESUMEN.....	i
AGRADECIMIENTOS.....	ii
TABLA DE CONTENIDOS.....	iii
LISTA DE TABLAS	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
NOMENCLATURA.....	viii
1 ALCANCES Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.1 Contextualización General.....	1
1.2 Antecedentes	2
1.3 Justificación del Estudio	3
1.4 Planteamiento del Problema.....	4
1.5 Objetivos	6
1.5.1 Objetivo general	6
1.5.2 Objetivos específicos.....	6
1.6 Alcances y Límites del Estudio	6
2 MARCO TEÓRICO	8
2.1 Metales pesados en aguas subterráneas y superficiales: contexto hidrogeológico y salud ambiental	8
2.2 Comportamiento geoquímico de los metales pesados en acuíferos y cuerpos de agua superficiales	9

2.3	Métodos de evaluación de la calidad del agua para metales pesados.....	13
2.4	Normativas sobre límites permisibles de metales pesados en el agua (El Salvador e internacionales).....	16
2.4.1	Agua cruda para potabilizar por métodos convencionales	17
2.4.2	Agua para consumo de especies de producción animal	17
2.4.3	Agua para riego agrícola sin restricciones	17
2.4.4	Agua para actividades recreativas con contacto humano	17
2.5	Caracterización Geológica e Hidrogeológica del Lago de Coatepeque relacionada con la presencia y movilidad de metales pesados	18
2.5.1	Formación y contexto geológico regional.....	18
2.5.2	Unidades hidrogeológicas relevantes en la cuenca	18
2.5.3	Influencia de la estructura geológica en el transporte y distribución de metales pesados	19
2.5.4	Dinámica y dirección general del flujo subterráneo.....	19
2.5.5	Interacción entre aguas superficiales y subterráneas	20
3	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	21
3.1	Enfoque metodológico.....	21
3.2	Área de estudio	21
3.3	Diseño muestral y población.....	21
3.4	Procedimiento de muestreo.....	22
3.5	Preservación y transporte de muestras	22
3.6	Análisis de laboratorio	22
3.7	Calidad de los datos.....	22
3.8	Uso de datos secundarios	23

3.9	Tratamiento de datos y evaluación normativa.....	23
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	24
4.1	Introducción a los Resultados.....	24
4.2	Presentación de Resultados.....	24
4.2.1	Descripción General de los Puntos de Muestreo	24
4.2.2	Calidad del Agua según el Índice CCME WQI	26
4.2.3	Concentraciones de Metales Pesados.....	29
4.2.4	Parámetros Físicoquímicos Relevantes (pH y Conductividad).....	31
4.3	Análisis de los Resultados.....	33
4.4	Comparación con Estudios Previos	34
4.5	Implicaciones Ambientales y de Uso del Agua	36
4.6	Limitaciones del Estudio.....	37
4.7	Contribución del Estudio.....	38
5	CONCLUSIONES	40
6	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	42

LISTA DE TABLAS

Tabla 4.1 Puntos de Muestreo y Ubicación.....	26
Tabla 4.2 Normativas Utilizadas para la Evaluación de la Calidad del Agua Subterránea	27
Tabla 4.3 CCME WQI para Agua Subterránea según el Enfoque Aplicado.....	28
Tabla 4.4 Concentraciones de metales pesados en agua subterránea (mg/L).....	30
Tabla 4.5 Valores de pH y conductividad eléctrica en ($\mu\text{S}/\text{cm}$) en agua subterránea.	32

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1: Ubicación espacial de los puntos de muestreo en la cuenca del lago de Coatepeque	25
--	----

NOMENCLATURA

Símbolos y Unidades

- **pH** – Potencial de hidrógeno (unidad adimensional).
- **µS/cm** – Microsiemens por centímetro (unidad de conductividad eléctrica).
- **mg/L** – Miligramos por litro (unidad de concentración).
- **°C** – Grados Celsius (unidad de temperatura).
- **NTU** – Unidades Nefelométricas de Turbidez.
- **NMP/100 mL** – Número más probable por 100 mililitros (unidad para coliformes).
- **DBO** – Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg/L).

Abreviaturas y Siglas

- **AAS** – Espectrometría de Absorción Atómica.
- **CCME WQI** – Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index.
- **DBO** – Demanda Bioquímica de Oxígeno.
- **EPA** – Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental de EE.UU.).
- **FAO** – Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- **ICP-MS** – Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente.
- **ICP-OES** – Espectroscopía de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente.
- **MARN** – Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (El Salvador).
- **OMS** – Organización Mundial de la Salud.
- **QGIS** – Sistema de Información Geográfica de Código Abierto.
- **SMWW** – Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.

Índices e Indicadores

- **F1, F2, F3** – Componentes del CCME WQI (alcance, frecuencia y amplitud).
- **CCME WQI** – Índice integrado de calidad del agua, basado en F1, F2 y F3.
- **Kd** – Coeficiente de distribución sólido-líquido (L/kg).
- **Eh** – Potencial redox (milivoltios, mV).

1 ALCANCES Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 CONTEXTUALIZACIÓN GENERAL

La cuenca del lago de Coatepeque se localiza en el occidente de El Salvador, dentro del departamento de Santa Ana. Esta cuenca hidrográfica se caracteriza por su origen volcánico, topografía cerrada y presencia de formaciones geológicas de origen ígneo, lo cual condiciona tanto la disponibilidad como las características fisicoquímicas del recurso hídrico. En ella confluyen diversas formas de aprovechamiento del agua, incluyendo usos domésticos, agrícolas, recreativos y turísticos, lo que convierte al recurso hídrico en un elemento estratégico para la sostenibilidad ambiental y socioeconómica de la región.

El sistema acuífero subyacente, aunque menos visible que el cuerpo lacustre superficial, cumple un papel fundamental en el equilibrio hídrico de la cuenca. La infiltración proveniente de escorrentías, lluvias locales y conexiones hidrogeológicas con zonas adyacentes, alimenta un sistema de aguas subterráneas que puede actuar como fuente de abastecimiento para actividades humanas o ecosistemas dependientes del flujo base. A pesar de esta importancia, la información disponible sobre la calidad del agua subterránea en la zona es limitada, particularmente en lo que respecta a la presencia de metales pesados.

Los metales pesados representan un grupo de elementos químicos que, cuando se encuentran en concentraciones elevadas, pueden comprometer la calidad del recurso hídrico y generar efectos adversos para la salud humana y el ambiente. Su presencia en acuíferos puede deberse a procesos naturales como la disolución de minerales en formaciones geológicas específicas, pero también puede estar influenciada por actividades humanas como el uso de agroquímicos, disposición inadecuada de residuos o infiltración desde fuentes superficiales contaminadas.

En contextos hidrogeológicos como el de la cuenca del lago de Coatepeque, caracterizados por su origen volcánico y su complejidad estructural, la evaluación de la calidad del agua subterránea requiere una aproximación técnica que considere tanto los procesos naturales de enriquecimiento como los posibles aportes antrópicos. La ausencia de monitoreos sistemáticos y la falta de datos actualizados sobre las condiciones del acuífero dificultan la

toma de decisiones informadas para la gestión del recurso, y limitan la capacidad de respuesta ante posibles situaciones de riesgo para la salud o la sostenibilidad del ecosistema.

Asimismo, se ha considerado la calidad del agua superficial mediante datos secundarios disponibles en informes institucionales, con fines comparativos y de referencia técnica, sin que ello implique una evaluación directa de ese recurso dentro del presente estudio.

1.2 ANTECEDENTES

La evaluación de la calidad del agua ha sido objeto de atención creciente en el contexto de la gestión integral de los recursos hídricos, especialmente en regiones donde coexisten usos múltiples del recurso y una presión sostenida sobre los sistemas acuáticos. En El Salvador, los esfuerzos institucionales se han centrado históricamente en cuerpos de agua superficiales, mientras que el conocimiento sistemático sobre aguas subterráneas permanece limitado, tanto en cobertura espacial como en profundidad temática.

En el caso de la cuenca del lago de Coatepeque, la información técnica disponible se ha enfocado predominantemente en el cuerpo lacustre, a través de evaluaciones impulsadas por entidades estatales como el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Entre ellas destaca el estudio titulado *“Evaluación de la calidad del agua del lago de Coatepeque, El Salvador – 2021”*, el cual aplicó el Índice Canadiense de Calidad del Agua (CCME WQI) a puntos seleccionados del espejo de agua superficial, incluyendo parámetros fisicoquímicos, microbiológicos y algunos metales. Sin embargo, dicho análisis no abarcó fuentes subterráneas, ni incluyó una caracterización específica del sistema acuífero de la cuenca.

Por otra parte, la literatura internacional ha documentado que en regiones volcánicas la presencia de elementos como arsénico, boro, mercurio y manganeso en acuíferos puede estar asociada a procesos geogénicos naturales, particularmente en zonas con actividad hidrotermal o mineralización secundaria (Smedley & Kinniburgh, 2002). Estos procesos, aunque no necesariamente vinculados a fuentes de contaminación antrópica, pueden comprometer la aptitud del agua para ciertos usos si las concentraciones exceden los valores establecidos en las normativas de calidad.

La ausencia de datos sistemáticos sobre la calidad del agua subterránea en la cuenca, especialmente en relación con metales pesados, constituye un vacío de información que limita la capacidad de evaluación de riesgos y dificulta el diseño de estrategias de protección, monitoreo o aprovechamiento del recurso. En este contexto, resulta necesario generar una línea base que permita caracterizar el estado actual del agua subterránea en el área, sirviendo como punto de partida para futuras evaluaciones comparativas o para la toma de decisiones en escenarios de planificación hídrica y ambiental.

Adicionalmente, con el fin de contextualizar los resultados obtenidos, este estudio incorpora de manera complementaria una comparación con datos de calidad de agua superficial disponibles en el informe del MARN (2021), sin que ello implique una evaluación directa del recurso superficial como parte del trabajo de campo desarrollado.

1.3 JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

El agua subterránea representa una fuente estratégica de abastecimiento en la cuenca del lago de Coatepeque, con aplicaciones que abarcan desde el consumo humano hasta usos agrícolas y recreativos. Sin embargo, la calidad de este recurso, especialmente en lo referente a la presencia de metales pesados, ha sido escasamente documentada. La falta de estudios sistemáticos sobre este componente limita la capacidad de evaluar su aptitud para distintos usos, lo que dificulta la toma de decisiones fundamentadas en materia de gestión hídrica, protección ambiental y salud pública.

El presente estudio se justifica en la necesidad de generar una línea base sobre la calidad del agua subterránea en la cuenca, con énfasis en la caracterización de metales pesados. Esta información es fundamental para establecer si el recurso es adecuado para usos como potabilización, consumo animal, riego o actividades recreativas, en función de los límites establecidos por normativas nacionales e internacionales.

En el contexto geológico de la región, caracterizado por formaciones de origen volcánico, es común que elementos como el arsénico, el boro o el mercurio puedan estar presentes en concentraciones elevadas como resultado de procesos naturales de disolución de minerales. La literatura científica ha documentado este tipo de fenómenos en ambientes hidrotermales o mineralizados (Smedley & Kinniburgh, 2002), donde la geología contribuye

directamente a la composición química del agua subterránea, sin necesidad de una fuente externa de contaminación.

Además, este estudio integra herramientas reconocidas como el Índice Canadiense de Calidad del Agua (CCME WQI), lo que permite una evaluación técnica basada en un marco metodológico validado y aplicable a contextos con múltiples parámetros de calidad. A ello se suma la comparación con estándares de calidad nacionales e internacionales, lo que amplía la aplicabilidad de los resultados y fortalece su utilidad para procesos de planificación, monitoreo o intervención en la cuenca.

Si bien el objetivo general del estudio incluye tanto el recurso superficial como el subterráneo, la investigación se ha centrado en el análisis directo de fuentes subterráneas. La inclusión del componente superficial se limita al uso de datos secundarios provenientes del informe del MARN (2021), con el propósito de contextualizar los resultados y facilitar su interpretación comparativa.

En conjunto, el estudio responde a una necesidad técnica y de política ambiental: contar con información confiable y contextualizada sobre la calidad del agua subterránea, en una cuenca donde este recurso ha sido históricamente menos explorado, pero cuya relevancia para el desarrollo sostenible y la protección del ambiente es incuestionable.

1.4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La gestión del recurso hídrico requiere contar con información confiable sobre su calidad, especialmente en entornos donde el agua subterránea constituye una fuente de abastecimiento relevante y, al mismo tiempo, poco conocida. En la cuenca del lago de Coatepeque, a pesar de su importancia ecológica y social, no se dispone de estudios sistemáticos sobre la calidad del agua subterránea, en particular respecto a la presencia de metales pesados. Esta situación limita la capacidad técnica para evaluar riesgos, planificar usos sostenibles y diseñar medidas de protección del acuífero.

La posible presencia de metales pesados en concentraciones superiores a los límites permitidos por la normativa nacional o internacional puede comprometer la aptitud del recurso para usos como consumo humano, riego o recreación. Dicha presencia puede estar relacionada tanto con procesos geológicos naturales, como ocurre en ambientes

volcánicos, como con actividades antrópicas no controladas. Sin embargo, en ausencia de datos confiables, no es posible establecer el estado actual del recurso ni anticipar escenarios de deterioro.

Por otro lado, si bien se cuenta con antecedentes institucionales sobre la calidad del agua superficial en la cuenca —principalmente a través del estudio publicado por el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN, 2021)—, esta información no contempla el recurso subterráneo. La falta de integración entre ambos componentes del sistema hídrico impide construir una visión completa sobre la situación de la cuenca y limita la efectividad de las acciones de monitoreo y gestión.

En este contexto, se plantea la necesidad de evaluar la calidad del agua subterránea de la cuenca del lago de Coatepeque con base en parámetros de metales pesados, mediante un diseño técnico que permita determinar su concentración, distribución espacial y posible aptitud para diferentes usos. Asimismo, se considera relevante utilizar la información disponible sobre el agua superficial como referencia comparativa, a fin de establecer puntos de coincidencia o diferencia que contribuyan a una interpretación más integral del sistema.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 Objetivo general

Caracterizar la presencia y concentración de metales pesados en el recurso hídrico subterráneo y superficial de la cuenca del lago de Coatepeque de El Salvador.

1.5.2 Objetivos específicos

- Identificar la presencia de metales pesados en las aguas subterráneas y superficiales de la cuenca del lago de Coatepeque.
- Determinar la concentración y distribución de los metales pesados en las aguas subterráneas y superficiales de la cuenca del lago de Coatepeque.
- Establecer las aptitudes de uso de las aguas subterráneas y superficiales de la cuenca del lago de Coatepeque.

1.6 ALCANCES Y LÍMITES DEL ESTUDIO

El presente estudio se enfoca en la evaluación de la calidad del recurso hídrico subterráneo en la cuenca del lago de Coatepeque, mediante la determinación de concentraciones de metales pesados y el análisis de su aptitud de uso con base en estándares nacionales e internacionales. El análisis incluye parámetros tales como arsénico, boro, mercurio, cadmio, plomo, entre otros, seleccionados por su relevancia ambiental y sanitaria. Asimismo, se incorporan parámetros fisicoquímicos básicos como pH y conductividad eléctrica para complementar la caracterización hidroquímica.

El alcance geográfico del estudio comprende nueve puntos de muestreo de agua subterránea ubicados en distintos sectores de la cuenca, seleccionados con base en criterios técnicos y logísticos. Los resultados obtenidos a partir de estas muestras permiten establecer una línea base sobre la composición de los metales pesados en el acuífero, e interpretar su posible relación con procesos geológicos o condiciones ambientales del entorno.

El análisis de la calidad del agua se realiza utilizando el Índice Canadiense de Calidad del Agua (CCME WQI), lo que permite integrar múltiples parámetros en una clasificación general del recurso. Además, se evalúa la aptitud del agua para distintos usos mediante la comparación con valores de referencia establecidos en normativas reconocidas. Este enfoque técnico permite identificar restricciones potenciales para el uso del agua subterránea sin necesidad de realizar un diagnóstico de fuentes de contaminación o modelamiento hidrogeológico.

En cuanto al componente superficial, el estudio no incluye muestreo ni análisis directo del agua superficial. No obstante, se incorporan datos secundarios provenientes del estudio oficial publicado por el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN, 2021) con el objetivo de establecer una referencia comparativa que permita contextualizar los resultados obtenidos en el análisis del recurso subterráneo.

Entre las principales limitaciones del estudio se encuentra la ausencia de una serie temporal de datos que permita evaluar variaciones estacionales, así como la imposibilidad de acceder a todos los sitios potenciales por restricciones de acceso o seguridad. Adicionalmente, el análisis se restringe a una caracterización puntual de calidad del agua, sin incluir aspectos relacionados con la dinámica del flujo subterráneo, las tasas de recarga del acuífero o la identificación de fuentes puntuales de contaminación.

En conjunto, los resultados obtenidos deben ser interpretados dentro del marco de estas limitaciones, reconociendo que el estudio constituye una aproximación inicial orientada a establecer una línea base técnica que pueda servir de insumo para futuras investigaciones o acciones de gestión en la cuenca.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 METALES PESADOS EN AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES: CONTEXTO HIDROGEOLÓGICO Y SALUD AMBIENTAL

Los **metales pesados** son elementos metálicos traza con densidades elevadas y toxicidad significativa, tales como el plomo (Pb), arsénico (As), mercurio (Hg), cadmio (Cd), cromo (Cr) y otros. Estos contaminantes pueden originarse de fuentes **naturales** (por ejemplo, desgaste de minerales, vulcanismo) o **antropogénicas** (minería, descargas industriales, uso de agroquímicos) y moverse hacia las aguas subterráneas y superficiales. La presencia de ciertos metales pesados suele estar vinculada a las características geológicas de la cuenca; por ejemplo, en regiones volcánicas es común encontrar arsénico natural en acuíferos o lagos debido a la disolución de minerales arsenicales del subsuelo (Lillo, 2010). En la cuenca del *Lago de Coatepeque* (El Salvador), de origen volcánico, se ha documentado que el agua presenta una composición natural con trazas de metales pesados, a lo que se suman fuentes de contaminación humana como la agricultura y las descargas residuales, incrementando los niveles de plomo, arsénico, mercurio, entre otros (Solózano, 2025), (Hernández, 2025). Por tanto, las condiciones **hidrogeológicas** (tipo de rocas, flujo subterráneo, interconexión con aguas superficiales) determinan en gran medida la ocurrencia y distribución de metales pesados en el agua.

La presencia de metales pesados en el recurso hídrico tiene implicaciones directas para la **salud ambiental y pública**. A diferencia de otros contaminantes, estos metales no se degradan y tienden a **bioacumularse** en los organismos, pudiendo concentrarse a lo largo de la cadena alimentaria hasta alcanzar al ser humano (Lopez, 2024). Diversos metales pesados (especialmente *no esenciales* para el organismo como Pb, As, Hg y Cd) son altamente tóxicos incluso a concentraciones bajas, acumulándose en tejidos (hígado, riñones, huesos, sistema nervioso) y provocando efectos crónicos como daño neurológico, renal, cardiovascular e incluso cáncer (Lopez, 2024). Por ejemplo, la exposición prolongada al arsénico en el agua potable se asocia con lesiones cutáneas, trastornos gastrointestinales y varios tipos de cáncer (EPA, 2024). El plomo, por su parte, es un metal acumulativo que causa afectaciones hematológicas y neurológicas severas, siendo especialmente perjudicial en el desarrollo infantil (Lopez, 2024). Debido a estos riesgos,

organismos internacionales y normativas nacionales establecen límites estrictos a la concentración de metales pesados en agua potable y otros usos, buscando garantizar que el agua **no represente un peligro para la salud** (Hernández, 2025). En suma, desde una perspectiva hidroambiental, la contaminación del agua por metales pesados es un problema crítico que combina factores geológicos, hídricos y sanitarios, requiriendo atención tanto en su monitoreo como en su regulación.

2.2 COMPORTAMIENTO GEOQUÍMICO DE LOS METALES PESADOS EN ACUÍFEROS Y CUERPOS DE AGUA SUPERFICIALES

En los sistemas acuáticos subterráneos y superficiales, los metales pesados experimentan diversos **procesos geoquímicos** que controlan su movilidad, distribución y destino final. Las principales interacciones incluyen la **especiación acuosa**, la **adsorción/desorción** en sólidos, la **precipitación/disolución** de fases minerales, y las transformaciones de **oxidación-reducción**, además de la incorporación a la biota (bioacumulación). Estos procesos actúan en conjunto determinando cuánto metal permanece disuelto en el agua y cuánto es retenido en sedimentos o en el suelo. A continuación, se describen los aspectos clave de dicho comportamiento:

- **Especiación y complejación:** Los metales pesados disueltos pueden encontrarse como iones libres (por ejemplo, Cd^{2+} , Pb^{2+} , AsO_4^{3-}), pero comúnmente forman **complejos** con ligandos inorgánicos (Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , etc.) u orgánicos (ácidos húmicos, aminoácidos). La formación de complejos puede neutralizar o cambiar la carga del metal y alterar su reactividad (McLean & Bledsoe, 1992). Por ejemplo, el ion mercurio (Hg^{2+}) forma complejos estables con cloruro (HgCl_2) en condiciones ligeramente ácidas, cambiando su especie predominante en solución (Enviro Wiki, 2022). La **especiación** depende de las condiciones de *pH*, *Eh* (potencial redox) y la presencia de otros iones; pequeñas variaciones en estas condiciones pueden cambiar la forma química dominante de un metal (e.g., pasar de una forma soluble a otra menos móvil). En general, entender qué especies acuosas predominan (arsenito vs arsenato, Cr(III) vs Cr(VI), etc.) es fundamental, ya que determina su toxicidad y movilidad.

- Adsorción y desorción:** La **adsorción** es el proceso por el cual los metales disueltos se fijan a la superficie de los sólidos minerales (arcillas, óxidos de hierro y manganeso, materia orgánica particulada, etc.), mientras que la **desorción** es el proceso inverso. La mayoría de metales pesados tienden a adsorberse fuertemente en medios geológicos, lo que *retarda* su transporte respecto al flujo del agua subterránea (Enviro Wiki, 2022). Esta partición contaminante-sólido reduce la concentración libre en el agua pero crea un reservorio potencial en el sedimento. La eficacia de la adsorción depende de varios **factores geoquímicos**: (a) el *pH* del agua, ya que en general los cationes metálicos (ej. Pb^{2+} , Cu^{2+}) se adsorben más en pH neutro a alcalino (precipitando o uniéndose a superficies cargadas negativamente), mientras que en pH muy ácidos la alta concentración de H^+ compite por los sitios y los metales permanecen más en solución (Bonorino et al., 2008); (b) la *carga y mineralogía* del adsorbente, siendo los óxidos de hierro y manganeso y las arcillas de carga negativa naturales adsorbentes muy comunes en suelos y acuíferos (por ejemplo, el arsénico (V) puede fijarse eficientemente en óxidos de Fe, limitando su movilidad) (Lillo, 2010).; (c) la presencia de **iones competidores**, ya sean aniones (ej. fosfatos, silicatos que compiten con arsenatos o cromatos por sitios de sorción aniónica) o cationes (Ca^{2+} , Mg^{2+} compitiendo con metales pesados por sitios de cambio catiónico), lo cual puede disminuir la adsorción de un metal datoscielo.org.ar; y (d) el *contenido de materia orgánica*, que puede proveer sitios de unión (complejos con grupos funcionales de ácidos húmicos) o por el contrario movilizar metales mediante complejos solubles. En resumen, la adsorción actúa como mecanismo de **atenuación natural** al inmovilizar metales en la matriz geológica, pero condiciones cambiantes de pH pueden provocar su desorción y reintroducción al agua con el tiempo.
- Precipitación y disolución:** Cuando la concentración de un metal y las condiciones químicas lo permiten, pueden formarse **minerales poco solubles** que remueven el metal de la fase acuosa (precipitación). Por ejemplo, en aguas alcalinas el Pb^{2+} y el Cd^{2+} pueden precipitar como carbonatos (cerusita $PbCO_3$, otavita $CdCO_3$) o hidróxidos, el arsenato puede formar escorodita ($FeAsO_4 \cdot 2H_2O$) en presencia de Fe(III), y en condiciones sulfurosas anóxicas metales como Pb, Cu y Zn precipitan como sulfuros metálicos insolubles. La **precipitación** convierte metales disueltos en

sólidos sedimentarios, reduciendo drásticamente su movilidad. A la inversa, cambios en las condiciones (p.ej. acidificación, ingreso de oxígeno) pueden inducir la **disolución** de esos compuestos y reliberar los metales al agua. El potencial redox es crítico en este sentido: bajo condiciones reductoras, ciertos metales cambian a estados de oxidación más solubles (ej. Fe(III) precipitado como hidróxido férrico puede reducirse a Fe(II) soluble; el sulfato puede reducirse a sulfuro y precipitar metales con él). Un caso emblemático es el arsénico en acuíferos: en ambientes oxidantes se encuentra como arsenato As(V) que suele co-precipitar o adsorberse fuertemente, pero en condiciones reductoras pasa a arsenito As(III) (más móvil y tóxico) y puede liberarse al agua subterránea, como se ha observado en acuíferos contaminados naturalmente por arsénico alrededor del mundo (Bonorino et al., 2008). En suma, las reacciones de precipitación/disolución están gobernadas por la **sobresaturación o saturación** de ciertos minerales y por el equilibrio termodinámico del sistema; a nivel teórico, el producto de solubilidad (K_{ps}) de los compuestos metálicos permite predecir si un metal tenderá a permanecer en solución o a formar sólidos en determinadas condiciones de pH y concentración de ligandos.

- **Movilidad y transporte:** La combinación de los procesos anteriores determina la **movilidad** de los metales pesados en el agua. Un metal altamente móvil es aquel que, bajo ciertas condiciones, permanece predominantemente en fase acuosa y puede migrar casi a la par del flujo de agua subterránea; en cambio, metales que se adsorben o precipitan fácilmente avanzan mucho más lento que el frente de agua, fenómeno conocido como **retardo en el transporte** (Enviro Wiki, 2022). El grado de retardo depende del carácter químico del metal y las propiedades del medio: por ejemplo, *plumas contaminantes* de cromo hexavalente (Cr(VI)) en aguas subterráneas pueden migrar más rápido en medios arenosos pobres en materia orgánica (debido a su menor adsorción aniónica), mientras que plumas de plomo o cobre avanzan apenas metros en el mismo medio por su fuerte fijación en los sedimentos. La heterogeneidad del acuífero (presencia de capas de arcilla, óxidos metálicos naturales, etc.) también crea zonas de mayor retención de metales. A escala de modelación, se emplean parámetros como el **coeficiente de distribución** K_d (que relaciona la concentración del metal en sólidos vs. en agua en equilibrio)

para cuantificar estos efectos, y se incorporan en las ecuaciones de transporte advectivo-dispersivo con términos de reacción. Es importante notar que la movilidad no es una propiedad fija del elemento, sino que **varía con las condiciones ambientales**: un metal inmóvil en condiciones actuales podría remobilizarse si cambia el pH (ej. acidificación por lluvia ácida) o si ingresa oxígeno en una zona reductora (liberando metales adsorbidos o precipitados). Por tanto, la evaluación del comportamiento de metales pesados requiere considerar escenarios geoquímicos cambiantes en el tiempo (Enviro Wiki, 2022).

En función de las condiciones geoquímicas observadas en cuencas volcánicas tropicales como la de Coatepeque, se espera que elementos como el arsénico, el hierro y el manganeso presenten mayor movilidad en ambientes reductores y con pH cercano a neutro o ligeramente ácido, mientras que otros como el plomo y el cadmio tienden a fijarse en sedimentos y suelos con alta presencia de óxidos metálicos. En medios con pH alcalino y alta dureza, ciertos metales como el zinc o el cobre pueden precipitar como carbonatos o hidróxidos, reduciendo su presencia disuelta. Estos patrones teóricos permiten establecer una base de referencia para interpretar la distribución observada en el campo y comprender las diferencias entre aguas superficiales y subterráneas.

- **Bioacumulación y efectos ecológicos:** Además de los procesos abióticos, los metales pesados pueden **incorporarse a los seres vivos** presentes en el agua, como algas, plantas acuáticas, invertebrados y peces. Muchos organismos pequeños adsorben o concentran metales de su entorno; cuando estos organismos son ingeridos por niveles tróficos superiores, el metal se transfiere y puede *biomagnificarse* en la cadena alimentaria. Este proceso, llamado **bioacumulación**, explica por qué se detectan altas concentraciones de mercurio o cadmio en tejidos de peces depredadores aun cuando el agua presenta niveles disueltos bajos. Los metales pesados tienden a unirse a proteínas y compuestos en los tejidos vivos y no se eliminan fácilmente, causando toxicidad en la fauna acuática (por ejemplo, malformaciones, efectos neurotóxicos y mortandad en peces expuestos a aguas con metales). La bioacumulación finalmente afecta también al ser humano que consume organismos contaminados (p. ej., metilmercurio en peces, que al ser ingerido impacta el sistema nervioso humano). Por ello, desde la óptica geoquímica

ambiental, la **fase biológica** actúa como un sumidero y a la vez vector de dispersión de los metales. Este componente biogeoquímico es parte integral del comportamiento de los metales pesados en cuerpos de agua, y se suele evaluar mediante índices de bioacumulación en tejidos y monitoreos de biodiversidad en zonas afectadas.

En síntesis, el comportamiento geoquímico de los metales pesados en acuíferos y aguas superficiales es complejo y resultado de múltiples procesos interdependientes. Cambios en el **pH** o **redox**, la presencia de ciertos minerales o compuestos naturales, y las interacciones biológicas pueden aumentar o disminuir drásticamente la concentración disuelta de un metal en un cuerpo de agua dado. Entender estos procesos –adsorción, precipitación, especiación y bioacumulación– y los factores que los afectan es esencial para predecir el destino de la contaminación por metales pesados y para diseñar estrategias adecuadas de remediación o gestión de la calidad del agua.

2.3 MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA PARA METALES PESADOS

La evaluación de la calidad del agua en relación con metales pesados involucra tanto la **caracterización físico-química** del medio acuático como la aplicación de **técnicas analíticas específicas** para cuantificar dichos elementos en muestras de agua. A continuación, se presentan los principales aspectos metodológicos:

- **Parámetros in situ y preparación de muestras:** Antes del análisis de metales, es fundamental medir *parámetros físico-químicos* generales del agua **in situ**, tales como el pH, la conductividad eléctrica, la temperatura, el potencial redox (Eh) y la concentración de oxígeno disuelto. Estos parámetros aportan contexto sobre las condiciones del agua que influirán en la química de los metales (por ejemplo, un pH alto puede sugerir posible precipitación de ciertos metales, un Eh bajo indica condiciones reductoras que afectan la especiación). También se evalúan turbidez y contenido de sólidos suspendidos, ya que los metales pueden asociarse a partículas. Para las muestras destinadas al análisis de metales traza, se siguen protocolos estandarizados de muestreo: típicamente se utilizan recipientes de polietileno o vidrio tratados, y las muestras de agua se **acidifican inmediatamente**

tras la recolección (p. ej., con ácido nítrico concentrado hasta $\text{pH} < 2$) para preservar los metales disueltos y evitar su adsorción a las paredes del recipiente o precipitación antes del análisis (Organismo Salvadoreño de Reglamentación Técnica, 2018). La acidificación asegura que los metales permanecen en solución y estabiliza la muestra durante su almacenamiento y transporte al laboratorio. Además, suele filtrarse la muestra ($0,45 \mu\text{m}$) si se desea distinguir metales “disueltos” de los “totales” (que incluirían la fracción particulada). Estas precauciones garantizan que los análisis subsecuentes reflejen con fidelidad la concentración de metales en el agua original.

- **Análisis instrumentales de metales pesados:** En laboratorio, la determinación cuantitativa de metales pesados en agua se realiza mediante técnicas instrumentales de **espectroscopía** altamente sensibles, dado que las concentraciones de interés suelen estar en el rango de microgramos por litro ($\mu\text{g/L}$). Uno de los métodos más difundidos es la **Espectrometría de Absorción Atómica (AAS)**, ya sea en su modalidad de llama o con horno de grafito, la cual permite detectar concentraciones trazas de metales individuales midiendo la absorción de luz en longitudes de onda características de cada elemento. Por ejemplo, la técnica AAS ha sido empleada rutinariamente para medir cadmio, plomo, cobre, etc., en muestras ambientales con límites de detección del orden de $0.001\text{--}0.01 \text{ mg/L}$. Otra técnica ampliamente utilizada es la **Espectroscopía de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES)**, y en aplicaciones de mayor precisión, la **Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS)**. Estas técnicas de plasma permiten la detección simultánea de múltiples metales con muy alta sensibilidad. De hecho, en estudios hidrogeoquímicos modernos es común el uso de ICP-MS para obtener concentraciones de elementos traza (As, Hg, Se, etc.) por debajo del $\mu\text{g/L}$ con alta exactitud. Tanto la AAS como el ICP requieren calibraciones con patrones certificados y suelen complementarse con análisis de recuperación y materiales de referencia para asegurar la calidad de los datos.
- **Métodos espectrofotométricos y otros enfoques:** Además de las técnicas anteriores, existen métodos **colorimétricos/espectrofotométricos** clásicos para ciertos metales, que, si bien han sido en gran medida reemplazados por AAS/ICP,

aún se utilizan en campo o en laboratorios básicos. Por ejemplo, para el **arsénico** se emplean kits basados en la formación de complejos coloreados (método del reagente de molibdeno-arseno o generación de arsina y tinción de papel mercúrico), y para el **chromo hexavalente** se usa la reacción con difenilcarbazida que produce un complejo violáceo medido en espectrofotómetro UV-Vis. Estos métodos ofrecen una estimación rápida, aunque con menor sensibilidad y especificidad que la instrumentación moderna. En cuanto al **mercurio**, debido a su volatilidad, a menudo se determina mediante técnicas especializadas como la generación de vapor frío acoplada a AAS. Otros enfoques técnicos reconocidos incluyen la **voltametría de redisolución anódica** (particularmente útil para metales como plomo, cadmio, zinc en agua dulce) y, para análisis exploratorios en terreno, equipos portátiles de **fluorescencia de rayos X (XRF)** o tiras reactivas indicativas (estos últimos de uso limitado, generalmente para tamizajes cualitativos). Es importante destacar que los métodos analíticos para metales pesados están normalizados en compendios como *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA) y en métodos EPA (serie 200.x para metales). La selección del método dependerá de la disponibilidad de equipo, el nivel de concentración esperado y la matriz de la muestra.

- **Parámetros complementarios e índices de calidad:** Junto con la medición directa de los metales, suele evaluarse una serie de parámetros físico-químicos que ayudan a interpretar la calidad del agua y el comportamiento de los metales. Por ejemplo, la dureza (concentraciones de Ca^{2+} y Mg^{2+}) es relevante porque influye en la toxicidad de metales como el plomo o cadmio hacia la vida acuática, ya que aguas más duras tienden a atenuar su biodisponibilidad. La alcalinidad y los iones mayoritarios (Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-}) también se miden, ya que pueden competir o formar complejos con los metales, afectando su movilidad y toxicidad.
- En evaluaciones integrales de calidad del agua se emplean herramientas como el Índice Canadiense de Calidad del Agua (Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index, CCME WQI), el cual permite sintetizar múltiples parámetros en un único valor representativo del estado del recurso hídrico. Este índice se basa en el grado de cumplimiento de las concentraciones medidas respecto a los criterios establecidos para un uso específico (p. ej., consumo

humano, riego, recreación), considerando la frecuencia, magnitud y variedad de los incumplimientos respecto a los estándares. Su aplicación proporciona una interpretación comparativa objetiva de los resultados analíticos y facilita la toma de decisiones en la gestión de calidad del agua.

En resumen, la evaluación de metales pesados en el agua combina **mediciones de campo, técnicas analíticas de laboratorio de alta sensibilidad, y herramientas de interpretación (parámetros auxiliares e índices)**. Este enfoque integral permite caracterizar el grado de contaminación por metales, comprender su relación con las condiciones del agua, y sentar bases para determinar si el recurso cumple con las normas de calidad vigentes o requiere acciones de remediación.

El uso del Índice Canadiense de Calidad del Agua (CCME-WQI) en este estudio responde a la necesidad de integrar múltiples parámetros de calidad del agua en una sola medida representativa, facilitando la comparación entre sitios y el análisis global del recurso. Aunque este índice ha sido aplicado tradicionalmente a cuerpos superficiales, diversos estudios recientes lo han adaptado con éxito para evaluar aguas subterráneas en regiones con presiones ambientales similares, dada su flexibilidad para incorporar distintos estándares normativos. En el contexto de la cuenca de Coatepeque, el CCME-WQI permite establecer una clasificación objetiva del estado del agua tanto superficial como subterránea, considerando simultáneamente la magnitud, frecuencia y tipo de incumplimientos normativos asociados a metales pesados y otros parámetros críticos.

2.4 NORMATIVAS SOBRE LÍMITES PERMISIBLES DE METALES PESADOS EN EL AGUA (EL SALVADOR E INTERNACIONALES)

La evaluación integral de la calidad del agua requiere contrastar los resultados analíticos obtenidos con valores normativos establecidos en documentos técnicos oficiales, cuya aplicación permite asegurar que el recurso hídrico no represente riesgos para la salud humana, animal, la agricultura o el uso recreativo. Para garantizar una evaluación técnica consistente con las metodologías oficiales empleadas en El Salvador, se adoptan en este estudio las mismas normativas utilizadas por el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) en la "Evaluación de la calidad del agua del lago de Coatepeque, El

Salvador - 2021". Esta decisión metodológica facilita una comparación directa con las evaluaciones oficiales y asegura la compatibilidad de los resultados generados.

2.4.1 Agua cruda para potabilizar por métodos convencionales

Para evaluar la calidad del agua destinada al consumo humano, se aplican los valores máximos permisibles contenidos en la cuarta edición de las "Guidelines for Drinking-Water Quality" (OMS, 2022), complementadas con el Decreto 1594 de 1984 (Ministerio de Salud de El Salvador), el Decreto Ejecutivo N.º 33903-MINAE-S (Costa Rica), la Ley Federal de Derechos (México, 2021), el Decreto Supremo N.º 015-2015-MINAM (Perú), y la Directiva 98/83/CE de la Unión Europea. Entre los parámetros de mayor relevancia toxicológica destacan: Arsénico (0.01 mg/L), Cadmio (0.003 mg/L), Mercurio (0.001 mg/L), Plomo (0.01 mg/L) y Cromo total (0.068 mg/L).

2.4.2 Agua para consumo de especies de producción animal

En esta categoría, los valores máximos permisibles se basan en las "Guías de calidad del agua para agricultura" (FAO, 2010). Los principales parámetros considerados incluyen Arsénico (0.2 mg/L), Cadmio (0.05 mg/L), Mercurio (0.01 mg/L), Plomo (0.1 mg/L), Zinc (24 mg/L), Cromo total (1.0 mg/L), además de criterios físico-químicos como la Conductividad eléctrica (1500 µS/cm) y Nitritos (10 mg/L).

2.4.3 Agua para riego agrícola sin restricciones

La calidad del agua destinada al riego agrícola se evalúa mediante los valores establecidos por las "Guías de calidad del agua para agricultura" (FAO, 2010), junto con los aportes del Decreto Ejecutivo N.º 33903-MINAE-S (Costa Rica) y la Ley Federal de Derechos (México, 2021). Entre los parámetros clave destacan Arsénico (0.1 mg/L), Cadmio (0.01 mg/L), Plomo (5.0 mg/L), Zinc (2.0 mg/L), Boro (0.7 mg/L), Sólidos Disueltos Totales (450 mg/L), Cloruros (142 mg/L), además del rango de pH recomendado entre 6.5 y 8.4.

2.4.4 Agua para actividades recreativas con contacto humano

Para la evaluación del agua destinada a usos recreativos con contacto humano, se toman como referencia los criterios establecidos en las "National Interim Primary Drinking Water Regulations" (EPA, 1976) y el Decreto Supremo N.º 015-2015-MINAM (Perú). Los parámetros normativos principales incluyen Coliformes fecales (200 NMP/100 mL), Oxígeno

disuelto (mínimo 5 mg/L), pH entre 6.0 y 9.0, Turbidez máxima (50 UNT) y Aceites y grasas (5 mg/L).

La adopción y aplicación sistemática de estas normativas internacionales y regionales aseguran una evaluación rigurosa y técnicamente fundamentada de la calidad del recurso hídrico, permitiendo así identificar posibles riesgos asociados con la presencia de metales pesados y apoyar las decisiones relacionadas con la gestión del agua en la cuenca del lago de Coatepeque.

2.5 CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA E HIDROGEOLÓGICA DEL LAGO DE COATEPEQUE RELACIONADA CON LA PRESENCIA Y MOVILIDAD DE METALES PESADOS

2.5.1 Formación y contexto geológico regional

El lago de Coatepeque se encuentra alojado en una caldera volcánica, cuyo origen se remonta al Pleistoceno, producto de erupciones volcánicas altamente explosivas (CEL & Geotérmica Italiana, 1992). La composición litológica predominante incluye principalmente rocas volcánicas ácidas a intermedias, tales como andesitas y basaltos, junto con depósitos piroclásticos que pueden aportar naturalmente metales pesados al ambiente acuático mediante procesos de meteorización y disolución química (Rivera De Montes, 2023).

2.5.2 Unidades hidrogeológicas relevantes en la cuenca

Las unidades hidrogeológicas predominantes en la cuenca del Lago de Coatepeque están constituidas por acuíferos volcánicos fisurados, caracterizados por una alta permeabilidad secundaria debido a la intensa fracturación de las rocas volcánicas. Las propiedades hidrogeológicas más relevantes identificadas en estos acuíferos, que influyen directamente en la movilidad y dispersión de los metales pesados, incluyen transmisividades que varían considerablemente desde 69 hasta 3,726 m²/día y coeficientes de almacenamiento estimados en el orden de 2.03×10^{-3} (Rivera De Montes, 2023).

2.5.3 Influencia de la estructura geológica en el transporte y distribución de metales pesados

La estructura geológica de la cuenca está dominada por fallas y fracturas que controlan la circulación del agua subterránea, creando rutas preferenciales para la migración de metales pesados. Las estructuras tectónicas transversales identificadas dentro de la caldera facilitan el transporte vertical y horizontal de contaminantes, incluyendo metales pesados, hacia las zonas saturadas y hacia el lago mismo. Este mecanismo es especialmente importante en zonas donde la fracturación es más intensa, incrementando así el riesgo de acumulación localizada de estos elementos en el agua subterránea y superficial (CEL & Geotérmica Italiana, 1992).

En contextos geológicos como el de la cuenca del lago de Coatepeque, caracterizados por la predominancia de rocas volcánicas y depósitos piroclásticos, es común que se produzca la liberación natural de metales pesados como arsénico, aluminio, hierro y manganeso a través de procesos de meteorización química y disolución mineral. Estos procesos se ven potenciados en áreas intensamente fracturadas debido a la mayor exposición de superficies minerales a la acción del agua subterránea y superficial, facilitando así la incorporación de estos metales al flujo hídrico. Estudios previos realizados en la región (CEL & Geotérmica Italiana, 1992; Rivera De Montes, 2023) han documentado cómo esta configuración estructural y litológica influye notablemente en la movilidad y concentración espacial de metales pesados, particularmente en acuíferos volcánicos fisurados como los presentes en la cuenca de estudio.

2.5.4 Dinámica y dirección general del flujo subterráneo

El flujo subterráneo en la cuenca presenta una dinámica compleja debido a la naturaleza fracturada del medio. Estudios recientes han mostrado que las líneas piezométricas indican un predominio de flujo en dirección sureste, con zonas de recarga definidas claramente hacia las partes altas de la cuenca y zonas de descarga hacia el lago. Esta dinámica condiciona significativamente la distribución espacial y temporal de metales pesados en las aguas superficiales y subterráneas, al transportar estos elementos desde las zonas de recarga hacia las zonas de descarga, concentrándolos especialmente en áreas específicas del lago (Rivera de Montes, 2023).

2.5.5 Interacción entre aguas superficiales y subterráneas

La interacción hidráulica entre el lago de Coatepeque y los acuíferos circundantes ha sido confirmada mediante estudios hidrogeoquímicos e isotópicos previos. Estas investigaciones han revelado la presencia significativa de agua subterránea en zonas cercanas al lago, con composiciones isotópicas indicativas de mezclas entre agua del lago y agua subterránea. Esta interacción es crítica en la dinámica de los metales pesados, facilitando su transporte desde los acuíferos hacia el cuerpo de agua superficial, especialmente a través de fracturas y zonas de fallas altamente permeables (Rivera de Montes, 2023; CEL & Geotérmica Italiana, 1992).

Diversos estudios realizados en ambientes volcánicos centroamericanos han documentado la presencia natural de metales pesados en acuíferos, como resultado de la disolución de minerales primarios y secundarios ricos en hierro, arsénico o manganeso. En el caso específico del lago de Coatepeque, los informes técnicos previos realizados por CEL & Geotérmica Italiana (1992) y más recientemente por Rivera de Montes (2023), ya advertían sobre la posible contribución natural de la litología al contenido de metales en el agua, aunque sin una caracterización cuantitativa detallada en aguas subterráneas. Este estudio complementa dichos antecedentes al incluir una caracterización sistemática de fuentes subterráneas, aspecto históricamente menos abordado por limitaciones logísticas o de acceso.

3 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 ENFOQUE METODOLÓGICO

La investigación desarrollada en la cuenca del Lago de Coatepeque, El Salvador, se clasifica como un estudio de enfoque cuantitativo y de tipo descriptivo. Su objetivo principal es caracterizar la presencia, distribución y concentración de metales pesados en aguas superficiales y subterráneas. Esta clasificación permite identificar niveles de contaminación con base en parámetros químicos, físicos y microbiológicos medidos en campo y laboratorio, sin establecer relaciones causales ni modelaciones predictivas. El estudio se centra en un análisis comparativo entre ambos tipos de fuentes hídricas en un mismo período de tiempo.

3.2 ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca del Lago de Coatepeque está ubicada en el departamento de Santa Ana, El Salvador. Este lago de origen volcánico constituye un ecosistema de alta importancia ecológica y económica, dada su biodiversidad, el uso del agua para actividades recreativas, agrícolas y turísticas, y su función como fuente de agua subterránea para distintas comunidades. La cuenca enfrenta problemas ambientales derivados de actividades humanas, como contaminación por metales pesados, eutrofización y deforestación, que amenazan la calidad del agua y la sostenibilidad del ecosistema.

3.3 DISEÑO MUESTRAL Y POBLACIÓN

La población objeto del estudio corresponde a los cuerpos de agua superficial (el lago) y fuentes subterráneas (pozos perforados y excavados, manantiales) de la cuenca del Lago de Coatepeque. La selección de la muestra fue no probabilística, mediante muestreo por conveniencia, considerando restricciones de acceso, propiedad privada y disponibilidad logística. Se seleccionaron nueve puntos de agua subterránea y ocho puntos de agua superficial, con el fin de cubrir espacialmente la mayor parte de la cuenca.

3.4 PROCEDIMIENTO DE MUESTREO

Las muestras de agua subterránea se recolectaron los días 21 y 23 de septiembre de 2021. Durante la recolección, se empleó una sonda multiparamétrica AP-5000 calibrada con solución Rapid Cal para la medición in situ de pH, temperatura, oxígeno disuelto y sólidos totales disueltos. El procedimiento de campo incluyó el purgado de pozos, uso de guantes, identificación de muestras por fecha y localización, y transporte en condiciones controladas.

3.5 PRESERVACIÓN Y TRANSPORTE DE MUESTRAS

Las muestras fueron preservadas según el tipo de parámetro a analizar, siguiendo los protocolos del Laboratorio de Calidad del Agua del Ministerio de Medio Ambiente. Se utilizaron conservantes químicos como ácido nítrico y sulfúrico, refrigeración a 4°C, y envases específicos para evitar degradación o alteración química y biológica. Los detalles se presentan en el Anexo 1.

3.6 ANÁLISIS DE LABORATORIO

El análisis se realizó en el Laboratorio de Calidad de Agua de la Dirección General del Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales. Se aplicaron métodos del compendio Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (SMWW) para la determinación de metales pesados, metaloides, parámetros físico-químicos, nutrientes, microbiología y demanda bioquímica de oxígeno (DBO). Cada resultado incluye valores de detección e incertidumbre.

3.7 CALIDAD DE LOS DATOS

Para garantizar la fiabilidad de los datos se implementaron controles de calidad en campo y laboratorio, incluyendo la calibración de equipos, registro trazable de procedimientos, y verificación de resultados con materiales de referencia certificados.

3.8 USO DE DATOS SECUNDARIOS

Se complementó la información obtenida con datos históricos de calidad del agua superficial proporcionados por el Ministerio de Medio Ambiente (MARN, 2021), los cuales abarcan series desde 2006 hasta 2020. Estos datos permitieron realizar comparaciones temporales e integrar valores de metales pesados con otros índices de calidad, como el CCME-WQI.

3.9 TRATAMIENTO DE DATOS Y EVALUACIÓN NORMATIVA

El tratamiento estadístico de los datos se realizó con Microsoft Excel para cálculos de tendencia, promedios y desviaciones. La representación espacial se desarrolló con QGIS, generando mapas temáticos de concentraciones y patrones de distribución. La evaluación normativa se efectuó utilizando valores límite de organismos internacionales (OMS, FAO, EPA, UE) y nacionales (MARN), y mediante la aplicación del Índice Canadiense de Calidad del Agua (CCME-WQI), que permite sintetizar los resultados para distintos usos del recurso.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 INTRODUCCIÓN A LOS RESULTADOS

El presente estudio tiene como objetivo caracterizar la presencia y concentración de metales pesados en las aguas superficiales y subterráneas de la cuenca del lago de Coatepeque. En esta sección, se presentan los resultados obtenidos a partir del muestreo y análisis realizados, organizados en función de los objetivos planteados.

Los valores obtenidos han sido comparados con los estándares nacionales de calidad del agua. En los casos en los que no existen lineamientos específicos en El Salvador, se han utilizado referencias internacionales. A partir de estos análisis, se establecen las concentraciones medidas de cada metal pesado en los distintos puntos de muestreo y se describen los patrones observados en su distribución.

Los datos presentados permiten evaluar la aptitud del agua para distintos usos en función de los límites establecidos en la normativa considerada. Además, se exponen las limitaciones del estudio en términos de metodología, cobertura espacial y aspectos analíticos, con el propósito de proporcionar un marco adecuado para la interpretación de los resultados.

4.2 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

4.2.1 Descripción General de los Puntos de Muestreo

El presente estudio incluyó el análisis de muestras de agua en un total de 17 puntos de muestreo distribuidos en la cuenca del lago de Coatepeque. Estos puntos fueron seleccionados con el propósito de evaluar la presencia y concentración de metales pesados en aguas superficiales y subterráneas, considerando su representatividad en diferentes sectores de la cuenca.

El muestreo directo se realizó en nueve puntos de agua subterránea los días 21 y 23 de septiembre de 2021, abarcando diferentes sectores de la cuenca con el objetivo de caracterizar la calidad del agua en fuentes subterráneas.

Adicionalmente, se incorporaron datos de ocho puntos de muestreo provenientes de informes del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN, 2021). De estos:

- Tres puntos (L1, L12 y L13) corresponden a informes de laboratorio proporcionados por la Dirección de Seguridad Hídrica (DSH) del MARN), con muestreos realizados en mayo de 2021.
- Cinco puntos (01Obrero, 02Centro, 03Anteos, 04DESLAE y 05 TERMAL) fueron extraídos de la evaluación oficial "Evaluación de la calidad del agua del lago de Coatepeque, El Salvador - 2021".

La ubicación de los puntos de muestreo respecto a la cuenca se muestra en la Figura 4.1 y en la Tabla 4.1, se presenta la información detallada de cada punto de muestreo, incluyendo su ubicación geográfica y el tipo de fuente de agua .

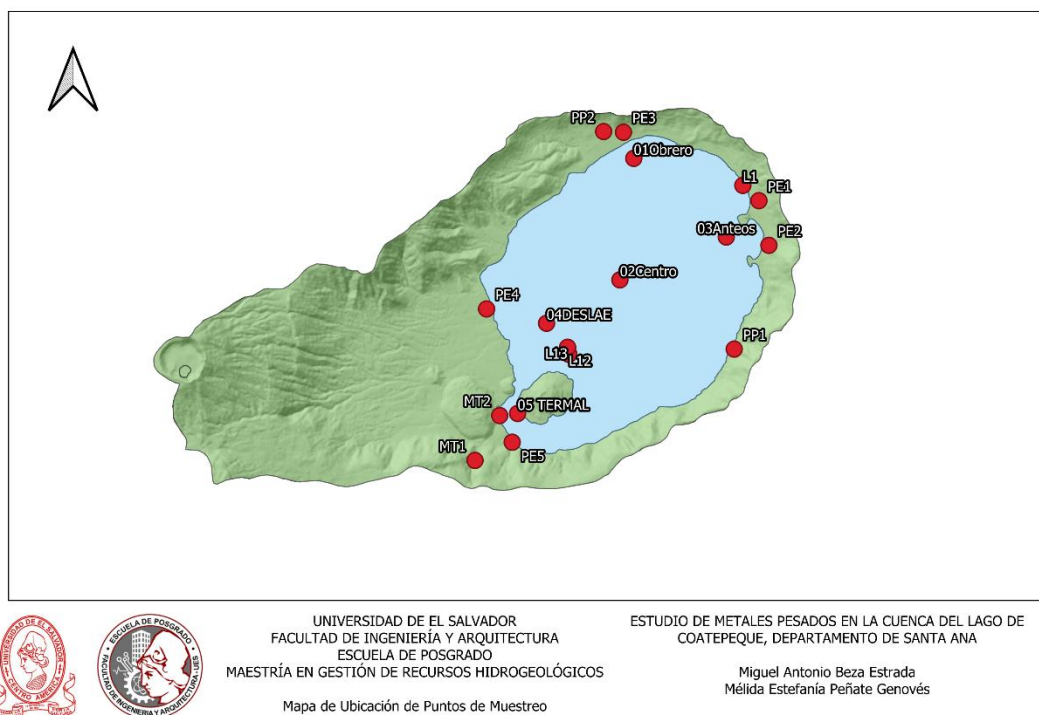


Figura 4.1: Ubicación espacial de los puntos de muestreo en la cuenca del lago de Coatepeque

Tabla 4.1 Puntos de Muestreo y Ubicación

Punto	Latitud	Longitud	Tipo
PP1	13.8525278	-89.5272306	Agua subterránea
PP2	13.89265	-89.5513	Agua subterránea
PE1	13.8799028	-89.5226778	Agua subterránea
PE2	13.8716667	-89.5208333	Agua subterránea
PE3	13.8925222	-89.5476444	Agua subterránea
PE4	13.8599361	-89.5728694	Agua subterránea
PE5	13.83535	-89.56815	Agua subterránea
MT1	13.832	-89.575	Agua subterránea
MT2	13.8402778	-89.5704556	Agua subterránea
L1	13.8827222	-89.5256389	Agua superficial
L12	13.8515556	-89.5576944	Agua superficial
L13	13.8528611	-89.5579444	Agua superficial
01Obrero	13.8877	-89.5457444	Agua superficial
02Centro	13.8652972	-89.5483	Agua superficial
03Anteos	13.8732	-89.5286972	Agua superficial
04DESLAE	13.8572917	-89.5618194	Agua superficial
05 TERMAL	13.8406556	-89.5671556	Agua superficial

Fuente: Elaboración propia

4.2.2 Calidad del Agua según el Índice CCME WQI

El Índice Canadiense de Calidad del Agua (**CCME WQI**) se aplicó a los datos obtenidos en este estudio para evaluar la calidad del agua subterránea en la cuenca del lago de Coatepeque. Este índice permite integrar múltiples parámetros de calidad del agua en una única clasificación, proporcionando una evaluación integral del recurso.

En este estudio, se calcularon dos enfoques metodológicos para evaluar la calidad del agua subterránea con base en diferentes estándares normativos:

- **CCME WQI restrictivo:** basado en los valores normativos más exigentes, representando una evaluación precautoria del recurso.
- **CCME WQI permisivo:** basado en los valores normativos menos restrictivos, permitiendo una evaluación más flexible sobre la posible utilización del recurso.

Los valores normativos utilizados para cada parámetro se tomaron de diversas fuentes oficiales, dependiendo de los estándares aplicados para la calidad del agua. En la Tabla 4.2, se presentan las principales normativas utilizadas en este estudio.

Tabla 4.2 Normativas Utilizadas para la Evaluación de la Calidad del Agua Subterránea

Normativa Aplicada	Fuente Oficial
Directiva 98/83/CE del Consejo de la Unión Europea sobre la calidad de las aguas destinadas al consumo humano	(Unión Europea, 1998)
Decreto 33903-MINAE-S	(Gobierno de Costa Rica, 2007)
Decreto 1594 de 1984	(República de Colombia, 1984)
Decreto Supremo N° 015-2015-MINAM	(República del Perú, 2015)
EPA 440-9-76-023 - Quality Criteria for Water	(United States Environmental Protection Agency (EPA), 1976)
Ley Federal de Derechos - Disposiciones aplicables en materia de aguas nacionales 2021	(Congreso de los Estados Unidos Mexicanos, 2021)
Guidelines for drinking-water quality	(Organización Mundial de la Salud (OMS), 2022)
Water quality for agriculture	(Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), 1985)

Fuente: Elaboración propia

El Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (**MARN, 2021**) ha aplicado su propia clasificación del CCME WQI exclusivamente para la evaluación de la calidad del agua **superficial** en el lago de Coatepeque. En este estudio, dicha clasificación se ha extrapolado al agua subterránea con el fin de establecer una comparación con los criterios utilizados a nivel nacional. Sin embargo, esta adaptación no constituye una metodología oficial para la evaluación de aguas subterráneas, sino un recurso analítico para facilitar la interpretación de los resultados obtenidos.

En la Tabla 4.3, se presentan los valores calculados de **CCME WQI** para el agua subterránea junto con su clasificación según la escala oficial del índice y la clasificación adaptada por el **MARN (2021)**.

Tabla 4.3 CCME WQI para Agua Subterránea según el Enfoque Aplicado

Enfoque de Evaluación	CCME WQI Agua Subterránea	Clasificación (CCME WQI Oficial)	Clasificación (MARN 2021)
Restictivo	48.08	Marginal/Regular	Mala
Permisivo	64.39	Razonable/Favorable	Regular

Fuente: Elaboración propia

Los resultados indican que la clasificación de la calidad del agua subterránea varía en función del criterio normativo utilizado. Aplicando el enfoque restrictivo, el CCME WQI obtenido clasifica el agua subterránea como **marginal o regular** según la metodología oficial del índice y como **mala** según la clasificación del **MARN (2021)**. Por otro lado, al aplicar un enfoque permisivo, la calidad del agua subterránea mejora a una clasificación **razonable o favorable** bajo el criterio del CCME WQI, mientras que en la escala del MARN (2021) se clasifica como **regular**.

El hecho de que ambos valores se encuentren dentro de rangos intermedios indica que la calidad del agua subterránea **puede presentar limitaciones para ciertos usos sin tratamiento previo**, lo que resalta la necesidad de considerar normativas específicas dependiendo del propósito de su aprovechamiento.

4.2.3 Concentraciones de Metales Pesados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos para las concentraciones de metales pesados en agua subterránea en los puntos de muestreo definidos. El análisis incluyó elementos comúnmente asociados a riesgos para la salud y el ambiente, entre ellos: arsénico, mercurio, cadmio, plomo, cromo total, boro, cobre, zinc, níquel, aluminio, hierro y manganeso.

Las muestras fueron analizadas por laboratorio acreditado. En los casos en que la concentración de un metal se encontró por debajo del límite de detección, se reportó dicho valor como el límite de detección provisto por el laboratorio. Esto permite confirmar que el análisis fue realizado, aunque sin evidencia cuantificable del metal dentro de los límites del método utilizado.

En la Tabla 4.4 se resumen las concentraciones de metales pesados en mg/L, obtenidas en los nueve puntos de agua subterránea muestreados. Se observan diferencias en la presencia y magnitud de los elementos, lo que puede estar relacionado con factores hidrogeológicos, condiciones del subsuelo y características antrópicas en el entorno inmediato de cada sitio.

Tabla 4.4 Concentraciones de metales pesados en agua subterránea (mg/L)

Punto	Zinc (Zn)	Mercurio (Hg)	Arsénico (As)	Boro (B)	Plomo (Pb)	Cobre (Cu)	Cadmio (Cd)	Níquel (Ni)	Aluminio (Al)	Hierro (Fe)	Manganeso (Mn)
PP1	0.027	0.0013	0.316	5.65	<0.000212	<0.004	<0.000196	<0.014	<0.00085	0.014	0.277
PP2	0.01	0.0007	0.122	1.93	<0.000213	<0.005	<0.000197	<0.015	<0.00086	<0.009	<0.024
PE1	0.022	0.005	0.062	1.05	<0.000214	<0.006	<0.000198	<0.016	<0.00087	<0.010	<0.025
PE2	0.013	0.0292	0.195	1.18	<0.000215	<0.007	<0.000199	<0.017	<0.00088	<0.011	<0.026
PE3	0.116	0.001	0.104	4	<0.000216	<0.008	<0.000200	<0.018	<0.00089	<0.012	<0.027
PE4	0.015	0.0019	0.395	2.22	<0.000217	<0.009	<0.000201	<0.019	<0.00090	<0.013	<0.028
PE5	0.014	0.0013	0.104	0.44	<0.000218	<0.010	<0.000202	<0.020	<0.00091	<0.014	<0.029
MT1	0.01	0.001	0.02	0.3	<0.000219	<0.011	<0.000203	<0.021	<0.00092	<0.015	<0.030
MT2	0.014	0.043	0.757	7.13	<0.000220	<0.012	<0.000204	<0.022	<0.00093	<0.016	<0.031

Fuente: Elaboración propia

El análisis muestra que el **arsénico** presenta concentraciones detectables en todos los puntos, con valores que oscilan entre 0.02 y 0.757 mg/L, siendo este último valor registrado en el punto MT2. En términos de magnitud, el arsénico constituye uno de los elementos más relevantes del conjunto analizado.

El **boro** también se encuentra en todos los sitios, con concentraciones que superan 1 mg/L en la mayoría de los puntos y alcanzan un valor máximo de 7.13 mg/L. Esto podría reflejar la influencia de procesos geogénicos asociados a condiciones volcánicas o termales en el subsuelo.

El **mercurio** se detectó en niveles variables, con una concentración máxima de 0.043 mg/L también en el punto MT2. La detección de este metal en varios sitios sugiere la necesidad de seguimiento, dada su alta toxicidad aún en concentraciones muy bajas.

Metales como **cadmio, plomo, cobre, níquel, aluminio, hierro y manganeso** fueron reportados en la mayoría de los casos por debajo del límite de detección o con valores muy bajos, lo que indica una baja presencia en las muestras evaluadas.

En conjunto, los resultados reflejan la existencia de metales pesados en el agua subterránea de la cuenca, con una variabilidad que amerita análisis más profundos en cuanto a fuentes potenciales, procesos geológicos asociados y posibles implicaciones para los usos del recurso. Sin embargo, tal análisis excede el alcance del presente estudio.

4.2.4 Parámetros Fisicoquímicos Relevantes (pH y Conductividad)

En complemento al análisis de metales pesados, se evaluaron dos parámetros fisicoquímicos fundamentales para la caracterización general del agua subterránea: **pH** y **conductividad eléctrica**. Estos parámetros permiten identificar condiciones que influyen en la movilidad, solubilidad y estabilidad de los metales en el medio acuoso, y, por tanto, aportan contexto a los resultados presentados en la sección anterior.

Los valores de pH registrados en los puntos de muestreo se encuentran dentro de un rango que va de 6.99 a 8.08, lo cual indica condiciones ligeramente ácidas a levemente alcalinas. Estos valores se mantienen dentro del intervalo típico de aguas naturales subterráneas, y

no se observaron desviaciones significativas que puedan indicar procesos de acidificación o contaminación ácida en el sistema.

La **conductividad eléctrica** presentó mayor variabilidad entre los puntos de muestreo, con valores que oscilan entre 563 $\mu\text{S/cm}$ y 3392 $\mu\text{S/cm}$. Este rango de conductividad sugiere diferencias en la mineralización del agua subterránea en función de la geología local y el tiempo de residencia del agua en el acuífero. Valores elevados de conductividad, como los registrados en PP1 y PE3, podrían estar asociados a una mayor presencia de sólidos disueltos y, potencialmente, a procesos de disolución de minerales que pueden liberar metales al medio.

Estos parámetros permiten interpretar, en parte, la distribución de algunos metales pesados. Por ejemplo, la alta concentración de boro y arsénico en ciertos puntos podría estar relacionada con **zonas de mayor conductividad**, donde la interacción prolongada del agua con el material geológico favorece la liberación de estos elementos. Asimismo, la relativa neutralidad del pH en la mayoría de puntos indica condiciones que, si bien no promueven la inmovilización de metales por precipitación, tampoco favorecen su movilidad extrema.

En la Tabla 4.5, se presentan los valores de pH y conductividad registrados en los puntos de muestreo de agua subterránea.

Tabla 4.5 Valores de pH y conductividad eléctrica en ($\mu\text{S/cm}$) en agua subterránea.

Punto	pH	Conductividad
PP1	7.51	3392
PP2	7.69	1489
PE1	7.52	1617
PE2	6.99	840
PE3	7.37	3370
PE4	7.15	2291
PE5	7.07	1070
MT1	8.08	563
MT2	7.45	1756

Fuente: Elaboración propia

4.3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

El análisis de los resultados obtenidos permite identificar comportamientos diferenciados en la calidad del agua subterránea en la cuenca del lago de Coatepeque, tanto en términos de concentración de metales pesados como en sus propiedades fisicoquímicas. Si bien la mayoría de los parámetros evaluados presentan concentraciones bajas o no detectables, algunos elementos, como el arsénico, el boro y el mercurio, registraron valores que deben ser considerados relevantes para la caracterización del recurso.

La presencia generalizada de **arsénico** en todos los puntos analizados, con concentraciones que superan 0.1 mg/L en varios sitios, indica una condición de fondo que puede estar asociada a la litología de la zona o a procesos hidrogeoquímicos propios de medios volcánicos. La concentración máxima (0.757 mg/L) fue identificada en el punto MT2, coincidiendo con uno de los valores más altos de conductividad, lo que sugiere una mayor mineralización del agua en ese sector.

El **boro** también presentó valores elevados, con un rango que va desde 0.3 hasta 7.13 mg/L. Este comportamiento podría estar relacionado con zonas de influencia termal, donde procesos geológicos naturales favorecen la liberación de este elemento al agua subterránea. La ocurrencia simultánea de boro y arsénico en niveles significativos respalda esta interpretación.

En cuanto al **mercurio**, si bien sus concentraciones fueron menores que las de otros metales, su presencia en puntos como MT2 (0.043 mg/L) y PE2 (0.0292 mg/L) debe considerarse relevante debido a su alta toxicidad, aún en concentraciones reducidas. Este comportamiento podría estar vinculado a características específicas del acuífero o a procesos locales de movilización.

El análisis del índice **CCME WQI** permitió evaluar la calidad del agua subterránea desde una perspectiva integral. Bajo un enfoque restrictivo, el valor obtenido (48.08) ubicó al recurso en la categoría de calidad **marginal o regular** (según el índice oficial) y **mala** (según la clasificación del MARN, 2021). Por su parte, el enfoque permisivo arrojó un valor de 64.39, correspondiente a una calidad **razonable o favorable** en el índice oficial, y **regular** bajo el criterio nacional. Esta diferencia evidencia la influencia que tienen los

criterios normativos sobre la evaluación de calidad, reforzando la necesidad de contextualizar el análisis con base en el uso potencial del recurso.

Los parámetros **pH** y **conductividad** también aportan elementos interpretativos importantes. Mientras el pH se mantuvo dentro de un rango moderadamente neutro, sin extremos que favorezcan o inhiban significativamente la movilidad de metales, la conductividad mostró una mayor variabilidad. Este parámetro presentó sus valores más altos en los mismos puntos donde se registraron las mayores concentraciones de arsénico y boro, lo cual sugiere una posible relación entre mayor carga mineral y liberación de ciertos elementos metálicos.

En síntesis, los resultados evidencian que la calidad del agua subterránea en la cuenca del lago de Coatepeque presenta una condición heterogénea, con predominancia de bajos niveles de contaminación en varios puntos, pero con presencias significativas de ciertos metales que requieren atención. Esta caracterización contribuye a establecer una línea base para futuras evaluaciones y proporciona una referencia técnica útil para la planificación del uso del recurso hídrico en el área.

4.4 COMPARACIÓN CON ESTUDIOS PREVIOS

Dado el limitado acceso a estudios específicos sobre calidad de agua subterránea en la cuenca del lago de Coatepeque, la comparación de los resultados obtenidos en esta investigación se realiza principalmente con base en el informe publicado por el **Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN, 2021)**, el cual evaluó la calidad del agua superficial del lago en distintos puntos representativos.

Este estudio oficial aplicó el Índice Canadiense de Calidad del Agua (**CCME WQI**) para valorar la calidad del agua superficial, estableciendo una clasificación adaptada a las condiciones nacionales. En general, los resultados obtenidos por el MARN para agua superficial ubicaron al recurso dentro de las categorías de calidad **mala o regular**, dependiendo del punto de muestreo. Esta clasificación fue resultado de la presencia de contaminantes microbiológicos, nutrientes y metales pesados en niveles que, en algunos

casos, excedían los valores permitidos por la normativa nacional e internacional considerada.

En el presente estudio, al aplicar el mismo índice (CCME WQI) al agua **subterránea**, se obtuvo un comportamiento parcialmente comparable. Bajo un enfoque restrictivo, el recurso fue clasificado como **marginal o regular** según la escala oficial del índice, y como **mala** según la adaptación del MARN. Con un enfoque permisivo, el valor del índice se ubicó en la categoría **razonable o favorable** (oficial) y **regular** (MARN). Esta similitud en las clasificaciones sugiere que tanto el agua superficial como la subterránea de la cuenca presentan condiciones de calidad que deben ser gestionadas con precaución.

No obstante, la diferencia entre ambos estudios radica en la naturaleza del recurso analizado. Mientras el estudio del MARN se centra en un cuerpo de agua superficial abierto, sujeto a contaminaciones difusas e influencias externas, el presente trabajo se enfoca en fuentes subterráneas, cuyo comportamiento está condicionado por las características hidrogeológicas del acuífero. Esta diferencia en contexto también puede explicar ciertas divergencias en las concentraciones observadas de algunos elementos.

Además, este estudio incorpora datos que no habían sido considerados previamente, ampliando el conocimiento sobre la calidad del agua subterránea en la cuenca. Esto constituye un aporte significativo, dado que el informe del MARN no incluyó un análisis sistemático de este tipo de recurso, lo cual limitaba la posibilidad de realizar evaluaciones integradas del sistema hidrológico de la zona.

En conclusión, los resultados obtenidos muestran una coherencia general con los hallazgos del MARN para el agua superficial, especialmente en cuanto a la clasificación del recurso como regular o mala bajo estándares exigentes. Sin embargo, aportan también una línea base para el análisis de la calidad del agua subterránea, hasta ahora poco documentada, que permite comenzar a identificar similitudes, diferencias y necesidades específicas de monitoreo y gestión para cada tipo de recurso.

4.5 IMPLICACIONES AMBIENTALES Y DE USO DEL AGUA

Los resultados obtenidos permiten identificar implicaciones relevantes para la gestión ambiental y el uso del recurso hídrico subterráneo en la cuenca del lago de Coatepeque. Si bien el estudio no abordó la identificación directa de fuentes de contaminación, las concentraciones registradas de ciertos metales pesados permiten establecer consideraciones preliminares sobre el estado del acuífero y su aptitud para distintos usos.

La presencia sistemática de **arsénico** en todos los puntos de muestreo, con concentraciones que superan ampliamente los límites recomendados por organismos internacionales en varios sitios, representa un factor crítico para la calidad del agua. Su origen, posiblemente asociado a procesos geogénicos vinculados a la litología volcánica del área, plantea una condición de fondo que podría limitar el uso del agua subterránea para consumo humano sin tratamiento adecuado.

El **boro**, con valores superiores a los umbrales considerados aceptables para potabilización en múltiples puntos, también requiere atención, especialmente por su potencial impacto en cultivos sensibles si el recurso se utiliza para riego agrícola. La detección de **mercurio** en algunos sitios, aunque en menores concentraciones, representa un riesgo adicional debido a su toxicidad acumulativa.

El índice CCME WQI, calculado con base en enfoques normativos diferenciados, ubicó la calidad del agua subterránea dentro de categorías **intermedias** (regular/mala en el enfoque restrictivo, razonable en el permisivo). Esto indica que el recurso presenta condiciones aceptables en algunos aspectos, pero también limitaciones importantes en función del uso que se pretenda asignar.

Desde el punto de vista ambiental, la presencia de metales pesados en el acuífero, aún sin superar de forma generalizada los límites normativos más permisivos, sugiere la necesidad de mantener un sistema de monitoreo periódico. Tal seguimiento permitiría observar la evolución de estos parámetros y detectar cambios que pudieran comprometer los ecosistemas acuáticos o los usuarios del recurso.

En cuanto a los usos del agua, los resultados señalan restricciones para su utilización como fuente de abastecimiento humano sin tratamiento previo. Para otros fines como el riego o el uso recreativo, los valores se encuentran en rangos más favorables, aunque deben considerarse los efectos acumulativos de ciertos elementos, especialmente cuando se utiliza de forma continua o en contacto directo con seres humanos.

En síntesis, las implicaciones derivadas del estudio refuerzan la necesidad de evaluar de manera diferenciada los usos del agua subterránea en la cuenca, incorporando criterios de calidad que consideren tanto los estándares normativos como las condiciones particulares del entorno geológico e hidroquímico.

4.6 LIMITACIONES DEL ESTUDIO

El estudio de metales pesados en la cuenca del lago de Coatepeque presenta diversas limitaciones que deben considerarse al interpretar los resultados. Estas limitaciones están relacionadas con la metodología utilizada, la cobertura del muestreo y el análisis de datos disponibles.

En primer lugar, la selección de puntos de muestreo estuvo determinada por factores logísticos y de acceso a las fuentes de agua, lo que puede influir en la representatividad espacial de los resultados. Si bien se procuró abarcar distintas zonas de la cuenca, la disponibilidad de datos estuvo condicionada por restricciones de seguridad, localización de los pozos y acceso a propiedades privadas.

Por otra parte, el estudio se basa en muestras puntuales recolectadas en septiembre de 2021, sin incluir mediciones estacionales ni monitoreos a lo largo del tiempo. Esto limita la posibilidad de evaluar variaciones temporales que pudieran afectar la concentración de los metales pesados, así como los efectos de eventos climáticos o antrópicos sobre la calidad del agua.

El análisis de calidad del agua se realizó con base en los parámetros disponibles, y aunque se incluyeron elementos relevantes como pH y conductividad, no se incorporaron otros indicadores fisicoquímicos, microbiológicos o isotópicos que podrían aportar mayor profundidad a la caracterización hidroquímica del recurso.

Asimismo, la comparación con los estándares normativos fue realizada utilizando normativas nacionales e internacionales vigentes. En los casos donde El Salvador no cuenta con lineamientos específicos, se recurrió a referencias de organismos multilaterales o de otros países. Esta diversidad normativa, aunque metodológicamente justificada, implica que algunos límites aplicados podrían diferir de futuros marcos regulatorios locales.

Finalmente, el estudio no incluye un análisis de correlación entre las concentraciones detectadas y posibles fuentes puntuales o difusas de contaminación. Dado que este tipo de análisis requiere una caracterización ambiental y antrópica más extensa, se considera fuera del alcance de esta investigación.

4.7 CONTRIBUCIÓN DEL ESTUDIO

El presente estudio proporciona información técnica sobre la calidad del agua subterránea en la cuenca del lago de Coatepeque, con énfasis en la presencia de metales pesados y en la aplicación de criterios de aptitud de uso. Hasta la fecha, los datos disponibles se habían concentrado principalmente en cuerpos de agua superficiales, mientras que la información sobre aguas subterráneas era limitada o inexistente.

Uno de los aportes más relevantes del estudio es la generación de una línea base cuantitativa para la evaluación de la calidad del agua subterránea en la zona. Este vacío de información se debía en parte a restricciones de acceso a pozos, tanto por razones logísticas como por limitaciones sociales vinculadas a la seguridad en el territorio. Esta investigación permitió superar parcialmente estas barreras y obtener datos directos a través de muestreo técnico en campo.

Como producto del análisis, se ha elaborado una caracterización detallada de las concentraciones de metales pesados por punto de muestreo, un análisis de calidad del agua mediante el índice CCME WQI, así como un diagnóstico de la aptitud del recurso hídrico para diferentes usos. La integración de normativas de referencia y la evaluación diferenciada entre agua superficial y subterránea fortalecen el valor comparativo de los resultados.

Los hallazgos presentados constituyen una referencia técnica para futuras investigaciones hidrogeológicas en la región, y ofrecen insumos que pueden ser considerados en procesos

de planificación ambiental, gestión del recurso hídrico y monitoreo de la calidad del agua. En especial, se espera que estos resultados sirvan de base para el diseño de estrategias de monitoreo permanente y para el establecimiento de políticas públicas orientadas a la protección y uso sostenible del acuífero.

Los resultados obtenidos en esta investigación permiten establecer una caracterización inicial de la calidad del agua subterránea en la cuenca del lago de Coatepeque, con énfasis en la presencia de metales pesados y su potencial influencia en la aptitud del recurso para distintos usos. La información generada constituye un insumo técnico relevante para comprender las condiciones hidroquímicas del acuífero, en un contexto donde el conocimiento previo sobre este recurso era escaso o inexistente.

A partir del análisis de las concentraciones medidas, del cálculo del índice CCME WQI y de la comparación con normativas internacionales, se identificaron elementos críticos como el arsénico, el boro y el mercurio, cuya presencia plantea desafíos para la gestión del recurso hídrico. Asimismo, se evidenciaron patrones locales que podrían estar vinculados a condiciones geológicas particulares del entorno.

La comparación con estudios previos sobre agua superficial y el enfoque diferenciado aplicado en este trabajo permiten avanzar hacia una visión integrada del sistema hídrico de la cuenca. Los hallazgos obtenidos deben considerarse como una base técnica inicial sobre la cual desarrollar futuros estudios más detallados, incluyendo monitoreos periódicos, caracterización hidrogeológica, y evaluación de riesgos asociados a la calidad del agua subterránea.

Con la información presentada en este capítulo, se da paso a la formulación de conclusiones y recomendaciones orientadas a la gestión sostenible del recurso y a la identificación de posibles líneas de investigación complementarias.

5 CONCLUSIONES

El presente estudio tuvo como objetivo principal caracterizar la calidad del agua subterránea en la cuenca del lago de Coatepeque, con énfasis en la presencia de metales pesados y su relación con los estándares de calidad establecidos para distintos usos. A partir de los resultados obtenidos mediante el muestreo, análisis de laboratorio y aplicación del índice CCME WQI, se concluye lo siguiente:

1. La concentración de metales pesados en los puntos de agua subterránea evaluados presenta una alta variabilidad espacial. Entre los elementos analizados, el arsénico, el boro y el mercurio mostraron las concentraciones más elevadas y frecuentes.
2. El arsénico se detectó en todos los puntos de muestreo, con valores que superan los límites recomendados por organismos internacionales en varias ubicaciones. Este comportamiento sugiere una condición de fondo posiblemente asociada a la geología volcánica de la zona.
3. Las concentraciones de boro también fueron elevadas, en algunos casos superiores a 5 mg/L, lo cual puede comprometer su uso en actividades agrícolas, especialmente en cultivos sensibles. La ocurrencia simultánea de arsénico y boro refuerza la hipótesis de un origen natural común.
4. El índice CCME WQI aplicado al agua subterránea permitió obtener una visión integrada de la calidad del recurso. Bajo un enfoque restrictivo, el agua fue clasificada como de calidad marginal o mala; mientras que bajo un enfoque permisivo, la clasificación mejoró a razonable o regular. Esta diferencia destaca la necesidad de contextualizar los criterios normativos en función del uso previsto del recurso.
5. El análisis de parámetros fisicoquímicos mostró que el pH se mantuvo dentro de un rango neutro, mientras que la conductividad eléctrica presentó mayor variabilidad. Los puntos con mayor conductividad coincidieron con concentraciones elevadas de ciertos metales, lo que indica una posible relación con la mineralización del agua.
6. La comparación con el estudio del MARN (2021) sobre agua superficial mostró que la calidad del agua subterránea se encuentra en niveles similares, aunque las

condiciones de acceso, vulnerabilidad y dinámica hidrogeoquímica son diferentes. Esto subraya la importancia de considerar el recurso subterráneo como un componente independiente dentro de la planificación hídrica de la cuenca.

7. La información generada por este estudio constituye una línea base para futuras investigaciones en la región y proporciona evidencia técnica útil para orientar acciones de monitoreo, gestión del recurso hídrico y definición de prioridades en políticas de protección ambiental.

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bonorino, A. G., Limbozzi, F., Albouy, R., & Lexow, C. (2008). Movilidad de metales y otros elementos en el acuífero loésico regional del suroeste bonaerense. *Geoacta*, 33, 31–42.
- CEL & Geotérmica Italiana. (1992). *Desarrollo de los Recursos Geotérmicos del Área Centro-Occidental de El Salvador*.
- Congreso de los Estados Unidos Mexicanos. (2021). *Ley Federal de Derechos—Disposiciones aplicables en materia de aguas nacionales 2021*.
- Enviro Wiki. (2022). *Metals and Metalloids—Mobility in Groundwater*.
https://www.enviro.wiki/index.php?title=Metals_and_Metalloids_-_Mobility_in_Groundwater#:~:text=Single%2C%20or%20free%2C%20dissolved%20Oions,acidic%20conditions%20by%20the%20reaction
- EPA. (2024, octubre 30). *Chemical Contaminant Rules* [Other Policies and Guidance].
<https://www.epa.gov/dwreginfo/chemical-contaminant-rules>
- Gobierno de Costa Rica. (2007). *Decreto 33903-MINAE-S - Reglamento para la calidad del agua potable*.
- Hernández, Ó. (2025, febrero 26). *Medio Ambiente|El Lago de Coatepeque envenena a sus habitantes mientras el gobierno guarda silencio*. Multimedia Periodismo - Humanidades.
<https://multimediaperiodismo.humanidades.ues.edu.sv/2025/02/26/medio-ambienteel-lago-de-coatepeque-envenena-a-sus-habitantes-mientras-el-gobierno-guarda-silencio/>

- Lillo, J. (2010). *Peligros geoquímicos: Arsénico de origen natural en las aguas*.
- Lopez, C. (2024, diciembre 23). Metales pesados: El daño invisible a la salud humana y ecosistémica. *Revista Endémico*. <https://endemico.org/metales-pesados-el-dano-invisible-a-la-salud-humana-y-ecosistemica/>
- McLean, J., & Bledsoe, B. (1992). *Ground Water Issue: Behavior of Metals in Soils*.
- Organismo Salvadoreño de Reglamentación Técnica. (2018, abril 4). *RTS 13.02.01:14 Agua. Agua de consumo humano. Requisitos de calidad e inocuidad*. Diario Oficial, Tomo 419, N.º 60, San Salvador.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). (1985). *Water quality for agriculture*. <https://www.fao.org/4/t0234e/T0234E00.htm#TOC>
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2022). *Guidelines for drinking-water quality*.
- República de Colombia. (1984). *Decreto 1594 de 1984*.
- República del Perú. (2015). *Decreto Supremo N° 015-2015-MINAM*.
- Rivera De Montes, M. (2023). *Elaboración de modelo hidrogeológico conceptual del sistema acuífero de la subcuenca del lago de Coatepeque, Departamento de Santa Ana*. Universidad de El Salvador.
- Smedley, P. L., & Kinniburgh, D. G. (2002). A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry*, 17(5), 517–568. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(02\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(02)00018-5)
- Solózano, W. (2025, marzo 21). Gobierno presenta avances en conservación del Lago de Coatepeque con nuevas tecnologías. *Diario El Salvador*.

<https://diarioelsalvador.com/gobierno-presenta-avances-en-conservacion-del-lago-de-coatepeque-con-nuevas-tecnologias-y-medidas-ambientales/635703/>

Unión Europea. (1998). *Directiva 98/83/CE del Consejo de la Unión Europea sobre la calidad de las aguas destinadas al consumo humano.*

United States Environmental Protection Agency (EPA). (1976). *EPA 440-9-76-023 – Quality Criteria for Water.*