



**UTMACH**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**Remoción de As de aguas residuales de procesos mineros hidrometalúrgicos  
mediante electrocoagulación**

**TORRES JARAMILLO JULISSA FERNANDA  
INGENIERA AMBIENTAL**

**VELEZ MORENO WILMER JAZMANY  
INGENIERO AMBIENTAL**

**MACHALA  
2024**



**UTMACH**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**Remoción de As de aguas residuales de procesos mineros  
hidrometalúrgicos mediante electrocoagulación**

**TORRES JARAMILLO JULISSA FERNANDA  
INGENIERA AMBIENTAL**

**VELEZ MORENO WILMER JAZMANY  
INGENIERO AMBIENTAL**

**MACHALA  
2024**



**UTMACH**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN**

**Remoción de As de aguas residuales de procesos mineros  
hidrometalúrgicos mediante electrocoagulación**

**TORRES JARAMILLO JULISSA FERNANDA  
INGENIERA AMBIENTAL**

**VELEZ MORENO WILMER JAZMANY  
INGENIERO AMBIENTAL**

**GARCIA OCHOA JAIME ARTURO**

**MACHALA  
2024**

# Remoción de As de aguas residuales de procesos mineros hidrometalúrgicos mediante electrocoagulación

*por* Wilmer Jazmany Velez Moreno

---

**Fecha de entrega:** 05-ago-2024 06:09p.m. (UTC-0500)

**Identificador de la entrega:** 2427873777

**Nombre del archivo:** s\_mineros\_hidrometalu\_rgicos\_mediante\_electrocoagulacio\_n\_1.pdf (1.7M)

**Total de palabras:** 13288

**Total de caracteres:** 76016

# Remoción de As de aguas residuales de procesos mineros hidrometalúrgicos mediante electrocoagulación

---

## INFORME DE ORIGINALIDAD

---

0%

INDICE DE SIMILITUD

0%

FUENTES DE INTERNET

0%

PUBLICACIONES

0%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

## FUENTES PRIMARIAS

---

1

Mariana V. Capparelli, Isabel Cipriani-Avila, Eliza Jara-Negrete, Sofía Acosta-López et al. "Emerging Contaminants in the Northeast Andean Foothills of Amazonia: The Case of Study of the City of Tena, Napo, Ecuador", *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2021

Publicación

<1%

---

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 15 words

Excluir bibliografía

Activo

## CLÁUSULA DE CESIÓN DE DERECHO DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO DIGITAL INSTITUCIONAL

Los que suscriben, TORRES JARAMILLO JULISSA FERNANDA y VELEZ MORENO WILMER JAZMANY, en calidad de autores del siguiente trabajo escrito titulado Remoción de As de aguas residuales de procesos mineros hidrometalúrgicos mediante electrocoagulación, otorgan a la Universidad Técnica de Machala, de forma gratuita y no exclusiva, los derechos de reproducción, distribución y comunicación pública de la obra, que constituye un trabajo de autoría propia, sobre la cual tienen potestad para otorgar los derechos contenidos en esta licencia.

Los autores declaran que el contenido que se publicará es de carácter académico y se enmarca en las disposiciones definidas por la Universidad Técnica de Machala.

Se autoriza a transformar la obra, únicamente cuando sea necesario, y a realizar las adaptaciones pertinentes para permitir su preservación, distribución y publicación en el Repositorio Digital Institucional de la Universidad Técnica de Machala.

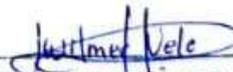
Los autores como garantes de la autoría de la obra y en relación a la misma, declaran que la universidad se encuentra libre de todo tipo de responsabilidad sobre el contenido de la obra y que asumen la responsabilidad frente a cualquier reclamo o demanda por parte de terceros de manera exclusiva.

Aceptando esta licencia, se cede a la Universidad Técnica de Machala el derecho exclusivo de archivar, reproducir, convertir, comunicar y/o distribuir la obra mundialmente en formato electrónico y digital a través de su Repositorio Digital Institucional, siempre y cuando no se lo haga para obtener beneficio económico.



TORRES JARAMILLO JULISSA FERNANDA

0704524404



VELEZ MORENO WILMER JAZMANY

0706990199

---

## DEDICATORIA

En este espacio queremos expresar nuestro más profundo agradecimiento a las personas que han sido pilares fundamentales en el desarrollo y culminación de nuestra tesis experimental:

" Remoción de Arsénico en aguas residuales hidrometalúrgicas mediante electrocoagulación".

Al Ing. Jaime García, mi tutor de tesis, le agradezco infinitamente por su invaluable guía, paciencia y apoyo constante durante todo el proceso de investigación. Sus valiosas enseñanzas y su aguda visión me han permitido crecer como investigador y enfrentar los retos con determinación. Su confianza en mi trabajo ha sido un motor fundamental para alcanzar mis metas.

Al Dr. Hugo Romero, mi cotutor, le expreso mi más sincero agradecimiento por su experta guía y las valiosas enseñanzas que me ha brindado. Su amplia experiencia y conocimiento en el campo de la bioenergía han sido invaluable para la realización de mi investigación. Agradezco su disposición para compartir sus conocimientos y su constante aliento durante todo el proceso.

Al Laboratorio de “Aplicaciones Electro analíticas y Bioenergía” de la facultad de Ciencias Químicas y de la Salud de la UTMACH, agradezco profundamente su apoyo incondicional en la realización de mi trabajo experimental. Agradezco especialmente a al Dr. Hugo Romero por su colaboración, paciencia y por brindarme las herramientas y el espacio necesarios para llevar a cabo mis experimentos.

A la Facultad de Ingeniería Civil, agradezco la oportunidad de haber realizado mis estudios y por brindarme las herramientas y recursos necesarios para culminar nuestra investigación.

---

## AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por su inmensa misericordia, por brindarme sabiduría y vida para culminar esta etapa. Gracias a mi padre Fernando Torres por sus valores y consejos que me guiaron, a mi madre Rosa Jaramillo por su infinito amor, apoyo y comprensión. Son mi pilar fundamental y la fuente de mi fortaleza. Agradezco profundamente todo lo que han hecho por mí a lo largo de mi vida. Sus sacrificios, enseñanzas y valores me han convertido en la persona que soy hoy. Me siento bendecida por tenerlos como padres.

Agradezco a mis suegros el Dr. Ángel Jaramillo y la Dra. Karina Guanolique de todo corazón por su cálida bienvenida a la familia. Me han recibido con los brazos abiertos y me han hecho sentir como en casa. Valoro su apoyo incondicional, gracias infinitas por ayudarme a culminar mi carrera.

A mi hijo Santhiel Jaramillo por ser luz en mi vida y la razón de mi ser. Gracias por llenar cada día de alegría y por estar a mi lado en cada tarea. Me inspiras a ser una mejor madre y profesional cada día. Te amo con todo mi corazón.

A mi esposo Paul Jaramillo gracias por ser mi compañero de vida, mi confidente y mi mejor amigo. Gracias por tu amor, tu paciencia y tu apoyo incondicional en todo momento. Gracias por ser mi mentor y mi guía en la realización de mi tesis gracias por tu preocupación y dedicación te agradezco de todo corazón. Me siento afortunada de compartir mi vida contigo.

Con todo mi amor y gratitud.

Julissa Fernanda Torres Jaramillo.

---

## AGRADECIMIENTO

Primeramente, a Dios por la sabiduría y guía en cada momento de mi vida. Por acompañarme en cada paso del camino, iluminando mi mente y brindándome la fuerza necesaria para enfrentar los desafíos.

A mis padres Bertha Consuelo Moreno y Wilmer Eduardo Velez Paladines son el pilar fundamental de este proceso, debido a su sacrificio y esfuerzo que han dado para poder alcanzar mis metas, por el apoyo incondicional que me han brindado económicamente y emocionalmente, por guiarme por el buen camino, la paciencia que me han tenido, por el cariño, los regaños, discusiones, todo esto me ha enseñado que las cosas se logran con disciplina, constancia y dedicación.

A mis hermanos Luis Eduardo Velez Moreno y Guísela Estefanía Velez Moreno y toda mi familia por el apoyo y ánimo en los momentos más complicados durante toda mi carrera universitaria y especialmente a mi sobrina Kristel Valentina López Velez, que desde el momento que llego a nuestras vidas ha sido muy diferente debido a su alegría y carisma. A mis abuelos Bertha Paladines y Eudaldo Velez, sé que están muy orgullosos de mí y me hubiese gustado tenerlos presentes y compartir con ellos estos logros en vida, los quiero y los extraño mucho.

A mis amigos y compañeros por la amistad y la confianza que me han dado a lo largo de este tiempo, por las experiencias y viajes que hemos tenido.

Con todo mi amor y gratitud.

Wilmer Jazmnay Velez Moreno.

---

## RESUMEN

El presente proyecto de investigación tuvo como objetivo remover el As en aguas residuales de procesos mineros hidrometalúrgicos, mediante la técnica de electrocoagulación. Se utilizó agua sintética con arsénico a una concentración de 2 ppm, ajustando variables críticas como pH y tiempo en tres ensayos (E1, E2, E3) en un flujo constante de 15 ml/min. El mejor ensayo obtenido se procedió a evaluar el porcentaje de remoción de As agua residual hidrometalúrgico. De acuerdo con los resultados obtenidos, en los 90 minutos lograron su mayor remoción de arsénico en agua sintética en los ensayos E1, E2 y E3, con valores de 93,8 %, 96,98 % y 88,29 %, respectivamente. El mejor porcentaje de remoción de arsénico en agua sintética se obtuvo en E2. Finalmente, se evaluó la remoción de As de agua residual hidrometalúrgica y alcanzó un porcentaje de 95,12 % en 90 minutos de electrocoagulación.

***Palabras clave* — Electrocoagulación, As, electroquímica, planta de beneficio, agua residual.**

---

## ABSTRACT

The objective of this research project was to remove *As* in wastewater from hydrometallurgical mining processes using the electrocoagulation technique. Synthetic water with arsenic at a concentration of 2 ppm was used, adjusting critical variables such as pH and time in three trials (E1, E2, E3) at a constant flow rate of 15 mL/min. The best test obtained was used to evaluate the percentage removal of hydrometallurgical wastewater. According to the results obtained, the highest arsenic removal in synthetic water was achieved in 90 minutes in tests E1, E2 and E3, with values of 93.8 %, 96.98 % and 88.29 %, respectively. The best percentage of arsenic removal in synthetic water was obtained in E2. Finally, the removal of *As* from hydrometallurgical wastewater was evaluated and reached a percentage of 95.12 % in 90 minutes of electrocoagulation.

***Keywords* — Electrocoagulation, As, electrochemistry, beneficiation plant, wastewater.**

---

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN .....	4
ABSTRACT .....	5
I. INTRODUCCIÓN .....	12
II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	14
A. Antecedentes.....	14
III. JUSTIFICACIÓN.....	16
IV. OBJETIVOS.....	18
A. Objetivo general.....	18
B. Objetivos específicos .....	18
V. HIPÓTESIS .....	19
VI. MARCO TEÓRICO .....	20
A. Minería.....	20
B. Hidrometalúrgica .....	20
C. Planta de beneficio.....	21
1) Fase de trituración .....	21
2) Fase de Clasificación .....	21
3) Fase de flotación.....	21
4) Fase de Concentración.....	22
5) Fase de disposición final (Relaves mineros). .....	22
6) Agua Residual.....	22
D. Arsénico As .....	22
1) Exposición al As.....	23
E. Electroquímica.....	23
1) Electrocoagulación (EC) .....	24

---

2)	Reacciones.....	26
3)	Procesos de remoción de As mediante electrocoagulación.....	27
4)	pH.....	27
a)	Diagrama Eh-pH para As .....	28
5)	Tiempo de electrólisis .....	28
6)	Flujo .....	29
a)	Proceso continuo.....	29
b)	Proceso discontinuo.....	29
c)	Densidad de corriente.....	29
F.	Equipo T-NEC-2000.....	30
1)	Celda electroquímica.....	31
G.	Marco Legal.....	32
1)	Constitución de la República del Ecuador .....	32
2)	Ley Minera .....	32
3)	Reglamento Ambiental de Actividades Mineras, Ministerio del Ambiente ...	32
4)	Acuerdo Ministerial 097-A Reforma Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente.....	32
a)	Norma de Calidad Ambiental y Descargas de Efluentes: Recurso Agua.....	32
VII.	METODOLOGÍA .....	34
A.	Recolección de la muestra de agua residual de proceso minero hidrometalúrgico ..	34
B.	Caracterización fisicoquímica de la muestra .....	35
C.	Ajuste de variables críticas para la remoción de arsénico .....	35
D.	Proceso de remoción por electrocoagulación .....	36
E.	Límites máximos permisibles de arsénico.....	37
F.	Diagrama de Flujo del Proceso.....	37

---

VIII. RESULTADOS .....	38
A. Análisis físico-químico de agua residual hidrometalúrgica .....	38
B. Ensayos de laboratorio del agua sintética y agua residual hidrometalúrgica .....	38
C. Porcentaje de remoción de arsénico .....	39
D. Análisis comparativo de los límites máximos permisibles establecidos en el acuerdo ministerial 097-A.....	43
IX. DISCUSIÓN.....	45
X. CONCLUSIONES.....	47
XI. RECOMENDACIONES .....	48
XII. REFERENCIAS.....	49

---

LISTA DE TABLAS

TABLA I LIMITES DE DESCARGA A UN CUERPO DE AGUA DULCE [74].....	33
TABLA II PUNTO DE LA TOMA DE MUESTRA.....	34
TABLA III CONDICIONES DE OPERACIÓN EN AGUA SINTÉTICA PARA EL DISEÑO.....	35
TABLA IV CONDICIONES DE OPERACIÓN PARA EL DISEÑO .....	36
TABLA V RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA LA MUESTRA RECOLECTADA.....	38
TABLA VI RESULTADOS DE REMOCIÓN DE ARSÉNICO EN AGUA SINTENTICA .....	38
TABLA VII RESULTADOS DE REMOCIÓN DE ARSÉNICO EN AGUA RESIDUAL HIDROMETALÚRGICA .....	39
TABLA VIII COMPARACIÓN DEL AGUA RESIDUAL HIDROMETALÚRGICA REMOVIDA EN UN PH DE 8 CON LOS LIMITES MAXIMOS PERMISIBLES DEL ACUERDO MINISTERIAL 097-A .....	43

---

**LISTA DE FIGURAS**

Fig. 1 Principio de la Electrocoagulación [32]. .....	25
Fig. 2 Reacción química del proceso de electrocoagulación [8]. .....	25
Fig. 3 Diagrama Eh-pH para arsénico a 25 °C y 101.3 KPa (Según Wang & Mulligan 2006) [62].....	28
Fig. 4 Modelo experimental del proceso de electrocoagulación [32].....	30
Fig. 5 Equipo electroquímico NEC-2000 [70]. .....	30
Fig. 6 Celda de electrocoagulación vista superior [32]. .....	31
Fig. 7. Mapa de ubicación de la toma de muestra .....	34
Fig. 8. Diagrama de flujo del proceso de remoción de arsénico por electrocoagulación .....	37
Fig. 9 Porcentaje de remoción de As en agua sintética a pH 4.....	40
Fig. 10 Porcentaje de remoción de As en agua sintética a pH 8.....	40
Fig. 11 Porcentaje de remoción de As en agua sintética a pH 12.....	41
Fig. 12 Porcentaje de remoción de arsénico en agua sintética en las tres experimentaciones. ....	42
Fig. 13 Porcentaje de remoción de As en agua residual hidrometalúrgica a pH 8.....	43

---

**SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS**

<b>Al</b>	Aluminio
<b>As</b>	As
<b>As (III)</b>	As trivalente
<b>As (V)</b>	As pentavalente
<b>Au</b>	Oro
<b>EC</b>	Electrocoagulación
<b>Fe</b>	Hierro
<b>Hg</b>	Mercurio
<b>IARC</b>	La Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer
<b>LPM</b>	Límites Máximos Permisibles
<b>MAPE</b>	Minería Artesanal y Pequeña Escala
<b>NaCN</b>	Cianuro de Sodio
<b>OCDE</b>	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos
<b>USEPA</b>	Agencia de protección Ambiental de los Estados Unidos
<b>OMS</b>	Organización mundial de la salud
<b>EPA</b>	Agencia de protección ambiental
<b>RAAM</b>	Reglamento ambiental de actividades mineras
<b>pH</b>	Potencial de hidrogeno
<b>(NaOH)</b>	Hidróxido de Sodio
<b>(HCl)</b>	Ácido clorhídrico
<b>C<sub>i</sub></b>	Concentración inicial
<b>C<sub>f</sub></b>	Concentración final
<b>%R</b>	Porcentaje de Remoción
<b>T-NEC</b>	Necon (equipo de electrocoagulación)
<b>PAM</b>	Poliacrilamida
<b>ppm</b>	Partes por millón
<b>min</b>	Minutos
<b>mg/L</b>	Miligramos entre litros.

---

## I. INTRODUCCIÓN

En Ecuador, la minería aurífera es mucho más antigua a la extracción de petróleo, que ha sido una forma de vida y subsistencia para miles de familias en el país, en el marco de la matriz productiva, esta actividad es considerada como sector estratégico, que es fuente de empleo e ingresos económicos de comunidades cercanas [1].

La actividad minera libera al ambiente una variedad de sustancias peligrosas como el metal pesado mercurio (*Hg*), el metaloide arsénico (*As*) y radicales anicónicos como cianuro de sodio (*NaCN*), degradando negativamente al ambiente y llegando a afectar a operadores mineros y las comunidades adyacentes [2].

La abundancia de *As* en la corteza terrestre es baja con un 0,0001%, sin embargo se encuentra en concentraciones elevadas en entornos naturales asociados con el plomo (*Pb*), cobre (*Cu*), oro (*Au*)<sup>5</sup> [3]. El *As* inorgánico está presente principalmente como *As* (III) y como *As* (V) en aguas naturales, siendo el primero más tóxico que el segundo, por ende, el *As* (III) es más difícil de remover que el *As* (V) [4]. El *As* (III) tiene mayor toxicidad y movilidad que el *As*(V). Por lo tanto, el *As* (III) en las aguas residuales debe oxidarse a *As* (V) antes de ser removido [3],[5].

La contaminación por *As* es producto de actividades antropogénicas, como la minería excesiva, metalúrgica y descargas de aguas residuales industriales [3]. Presenta una alta toxicidad, incluso en pequeñas concentraciones [6],[7], [8], afecta a la salud humana y puede ser mortal para los individuos que tienen contacto o consumo de agua, alimentos agrícolas y pesqueros contaminados [5], ocasionando lesiones cutáneas (hiperqueratosis), cambios de pigmentación, hipertensión, trastornos circulatorios, diabetes, pie negro, enfermedades cardiovasculares y cáncer de órganos internos como de vejiga, pulmón, riñón, entre otras enfermedades [9], [10].

Una de las formas de remover metales pesados es la electrocoagulación (EC), es una tecnología eficiente para la eliminación de *As* (III) y *As* (V) del agua contaminada, usando electrodos de varilla y placa de hierro (*Fe*) y aluminio *Al* [10]. Este método es de creciente interés para la eliminación de *As* debido a su alta eficiencia de eliminación [9].

La EC es un método, donde el agente floculante se genera mediante electro oxidación de un ánodo, generalmente compuesto de *Fe* o *Al*. Este proceso tiene algunas ventajas como la ausencia de adición de productos químicos coagulantes o floculantes para la pre oxidación

---

de *As* (III) a *As* (V), simplicidad de operación, instalación de tratamiento compacta y relativamente rentable y sobre todo mayor de eliminación de *As* [10].

---

## II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### A. Antecedentes

La industria extractiva como la minería, en la región de Latinoamérica ha permitido el desarrollo de varias naciones. Esta actividad altera los ecosistemas, contamina aguas superficiales y subterráneas [11]. El incremento de la extracción del mineral aurífero en nuestro país generado por la minería artesanal y pequeña minería (MAPE), ha desencadenado problemas sociales, ambientales y de salud pública en las comunidades periféricas en la expropiación y uso de tierras [12],[13], [16].

En Ecuador existen leyes, normativas y reglamentos ambientales relacionado a las actividades mineras, que indican como se debe realizar el procesamiento aurífero de manera ambientalmente responsable, aunque la situación actual del manejo de esta actividad extractiva se caracteriza por una ausencia casi total del cumplimiento de estas regulaciones, ocasionando degradación ambiental de áreas naturales. Las plantas procesadores de material aurífero generan grandes cantidades de residuos tóxicos como vertidos, relaves mineros y químicos usados en el proceso que se descargan directa o indirectamente, a través de deficientes embalses de relaves, a ríos cercanos [17], [18].

En el año 2016 se realizó un monitoreo ambiental en los cantones Zaruma- Portovelo donde se indicó que muchas de las plantas procesadoras de material aurífero tienen tuberías que desembocan directamente hacia los afluentes cercanos y existen relaves con altos niveles de metales tóxicos como *Hg*, *Cd*, *Cu*, *Mn*, *Pb* y *As* situados en las orillas del río. Además, se producen regularmente “vertimientos nocturnos” en los que camiones cargados de relaves y otros desechos del MAPE [2].

El cantón Camilo Ponce Enríquez, es una ciudad que se dedica a la extracción de material aurífero, los contaminantes generados por la actividad minera se han acumulado en zonas cercanas con uso de suelo agrícola e incluso se han encontrado trazas de *As* en la industria de cultivo de camarón, este metaloide se encuentra en altas concentraciones lo que ha afectado la región del estuario y áreas de manglares [19].

Las cuencas de los ríos Gala, Tenguel y Siete han sufrido secuelas por la contaminación de los acuíferos y aguas subterráneas a causa de las actividades mineras, agrícolas y ganaderas [20], [21]. Los ríos Tenguel , Fermín y Guanache tienen amenaza por la contaminación de elementos tóxicos y *As* debido a los relaves mineros, escombreras

---

abandonadas y sedimentos generados por las plantas procesadora de minerales auríferos [20], [22], [23], los ríos Fermín y Villa presenta bajas concentraciones de As en comparación al río Siete y Guanache, siendo el río Siete es el más afectado por las descargas de las plantas extractoras [24],[25], los altos niveles de metales pesados en este efluente superan los límites máximos permisibles (LMP)[20], el río Chico contiene concentraciones de As que exceden cinco veces los LPM establecidos por la legislación ecuatoriana para la preservación de la fauna acuática en agua dulce [26], [22]. Los cuerpos hídricos de este distrito minero muestran valores promedios de As que exceden significativamente veinte veces los LMP de la descarga a un cuerpo de agua dulce de acuerdo con la legislación ecuatoriana [26].

En el cantón Camilo Ponce Enrique existe una problemática de salud ocupacional sobre la presencia de metales pesados en aguas pocas profundas, sedimentos [22], suelos agrícolas y cultivos de la zona [27], que han reportado niveles muy elevados de concentración de metales pesados destacando la presencia del As [22]. Considerando que el As inorgánico es catalogado por la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) y la Agencia de protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) como tóxico y cancerígeno para los humanos en una exposición prolongada [4], [28].

---

### III. JUSTIFICACIÓN

La Organización Mundial de la Salud (OMS) advierte que el *As* es una de las diez sustancias químicas más peligrosas que afectan a la salud pública. En sus directrices para la calidad del agua potable, la OMS, la agencia de protección ambiental (EPA) y las Farmacopeas Europeas recomiendan un límite máximo de *As* de 10 µg/L en agua potable [3], [4], [9], estudios médicos han demostrado que la ingesta de *As* inorgánico ha causado, diabetes, enfermedades cutáneas e incluso enfermedades crónicas como el cáncer relacionados con la piel, riñón y vejiga urinaria [29], incluso ha causado la muerte por bioacumulación por falta de tratamientos eficaces en aguas residuales de procesos mineros hidrometalúrgicos [29].

La presente investigación se enfocará en la remoción del *As* de aguas residuales de los procesos mineros hidrometalúrgicos que se originan en las plantas de beneficio del cantón Camilo Ponce Enrique, estas aguas residuales contienen contaminantes tóxicos como metales pesados y residuos restantes derivados de los procesos de molienda, trituración, flotación y refinación del metal precioso el *Au*, las descargas directa de aguas residuales de procesamientos de minerales causa una grave contaminación ambiental [30] y una amenaza para la salud de las comunidades que habitan alrededor de las concepciones mineras. En contexto, la eliminación del *As* es muy esencial para preservar y garantizar el desarrollo sostenible [5].

En Ecuador, los procesamientos de minerales aurífero no han implementado tecnologías avanzadas para la remoción específica de *As*, es decir que los métodos fisicoquímicos como la sedimentación natural, la neutralización y la coagulación-floculación, la oxidación química, la adsorción son técnicas que se aplican en las plantas de beneficio, son discutibles debido a su baja eficiencia, particularmente para aguas residuales que contienen contaminantes metales pesados[30], y la mayoría de las plantas de procesamiento minero no aplican tratamientos eficientes para eliminar este metaloide por las condiciones operativas extremas, alto costo de operación y la gran inversión en instrumentos e instalación de los métodos antes mencionados.

Según el reglamento ambiental de actividades mineras (RAAM) en el Art. 84 menciona que el agua usadas en las plantas de beneficio deberán aplicar técnicas o procedimientos para la optimización del uso de agua basados en la reducción de uso,

---

recirculación y/o tratamiento y en el Art. 85 menciona que los procesos de las actividades mineras que generen descargas, deberán describir los sistemas de tratamiento de agua con sus especificaciones técnicas, que se aplicarán para asegurar su calidad de acuerdo con los límites permisibles establecidos en la normativa aplicable [31]. Sin embargo, se estima que en algunas plantas de beneficio no cumplen con lo estipulado y vierten ilegalmente sus desechos mineros sin ningún tratamiento en ríos, arroyos y otros sistemas de agua [2], causando una alteración hacia la naturaleza y a las comunidades cercanas de los sitios mineros, así como aquellos ubicados aguas abajo de los sitios de extracción de *Au* [1]. Además, el uso de agua contaminada por minas para la agricultura y acuicultura puede crear una infusión de metales tóxicos en los suelos que puede tener efectos secundarios en el suelo y la calidad de los cultivos, incluso en áreas alejadas de los sitios mineros [2].

Existen una variedad de técnicas electroquímicas disponibles para la remoción del *As*, en este caso se aplicará el método de electrocoagulación por ser el más eficiente y rentable a comparación de otros métodos emergentes [32]. Esta técnica de remoción podrá ser implementado de manera industrial para las plantas de beneficio del Ecuador y cumplir con los límites máximos permisibles de descarga a un cuerpo de agua dulce estipulados en el acuerdo ministerial 097-A.

---

#### IV. OBJETIVOS

##### *A. Objetivo general*

Remover el As en aguas residuales de procesos mineros hidrometalúrgicos, mediante la técnica de electrocoagulación, como un proceso previo a su descarga de acuerdo con la normativa ambiental vigente ecuatoriana.

##### *B. Objetivos específicos*

- Caracterizar fisicoquímicamente el agua residual de procesos mineros hidrometalúrgicos.
- Ajustar las variables críticas de pH y tiempo para la eficiencia de la remoción de As.
- Determinar el porcentaje de remoción de As en agua residual de procesos hidrometalúrgicos de las variables aplicadas.
- Comparar la remoción de As de las aguas residuales de procesos mineros hidrometalúrgicos con la Tabla 9 del Anexo 1 del libro V1 del TULSMA (acuerdo ministerial 097-A).

---

## V. HIPÓTESIS

Es posible remover el As de las aguas residuales de procesos mineros hidrometalúrgicos con la técnica de electrocoagulación, ajustando las variables críticas de pH y tiempo.

---

## VI. MARCO TEÓRICO

### A. Minería

La minería es la extracción de materiales geológicos y minerales valiosos de la superficie o de las profundidades de la tierra o de un yacimiento, fortaleciendo el desarrollo industrial, económico y social de muchos países. Aunque las minas ocupan menos del 1% de la superficie terrestre, la minería y el procesamiento de minerales conlleva a la contaminación del suelo, agua, deforestación, desplazamiento de comunidades, condiciones laborales, efectos en la salud del ser humano, etc. [33]. El interés de esta actividad es extraer *Au* un metal que se utiliza en la fabricación de joyería, electrónica, tecnologías de energía verde y medicina [34].

Ecuador en el 2018, registró una producción de *Au* de 11,5 Tm<sup>3</sup> toneladas métricas ubicándose en el décimo lugar entre los países de la región, y para el 2021 la minería invirtió aproximadamente USD 3,8 mil millones, un recurso destinado en fortalecer del sector social [1].

Las operaciones mineras, sin importar la escala, perjudican la parte social y ambiental, ocasionado pérdida de vegetación, biodiversidad, degradación y cambios del uso de suelo de cultivo, inseguridad alimentarla [35], sedimentación, destrucción de cuerpos hídricos, polución del aire, alto costo de vida y conflictos sociales [36],[35]. Las prácticas de la minera ilegal y artesanal exponen a sustancias toxicas como el *Hg*, *As* y *NaCN*, [1] a las comunidades circundantes [35],[37].

### B. Hidrometalúrgica

Las raíces de la hidrometalurgia se remontan al período de los alquimistas, cuando la transmutación de metales básicos en oro era su principal ocupación. Algunas de estas operaciones implicaban métodos húmedos, es decir, hidrometalúrgicos [38]. El procesamiento metalúrgico incluye las operaciones de fundición y refinación que producen metales puros y preparan la aleación [36].

La hidrometalurgia consiste en una serie de separaciones que comienzan con la lixiviación de minerales o concentrados y terminan con cátodos, polvos o compuestos bastante puros y comercializables recuperados de la solución [39].

---

El procesamiento hidrometalúrgico es muy eficaz para tratar este tipo de materiales porque puede controlar los diferentes niveles de impurezas, son ambientalmente más adecuados y económicos para tratar este tipo de materiales [40].

### *C. Planta de beneficio*

La industria de procesamiento de minerales consta de una serie de fases que ocurren en la cadena de beneficio del mineral, desde el momento en que el mineral se extrae en bruto hasta que el producto se entrega a las industrias metalúrgicas [41], para separar minerales valiosos (concentrado) y flujos de desechos [42]. El procesamiento de minerales incluye métodos físicos, químicos y mecánicos [36], entre ellos, los procesos de separación/concentración de minerales previo a la etapa de refinación [43].

A continuación, se detallan las fases del procesamiento de minerales en la planta de beneficio:

#### *1) Fase de trituración*

La trituración es una operación unitaria importante que implica la voladura de rocas y la trituración mecánica (trituración y molienda). El objetivo de esta fase es descomponer rocas grandes en partículas pequeñas, reduciendo el tamaño desde 1 m hasta 0,5 cm (dependiendo del tipo de circuito de molienda), liberando minerales de interés del mineral crudo para que los procesos de concentración posteriores puedan operar de manera óptima [41],[42].

#### *2) Fase de Clasificación*

El proceso de clasificación es una parte integral de cualquier circuito cerrado de molienda y su objetivo principal es devolver las partículas gruesas a la etapa de trituración para una mayor reducción de tamaño y dirigir las partículas finas (más pequeñas que el tamaño de molienda/tamaño de corte objetivo) a la flotación. En la última etapa de trituración, el tamaño del corte se selecciona en función del grado de liberación de mineral requerido [42].

#### *3) Fase de flotación*

Existe una variedad de métodos de separación de minerales disponibles. Entre ellas, la flotación por espuma es la técnica de separación de minerales más importante para muchas materias primas metálicas/minerales, el procesamiento sin una etapa de flotación sería impensable. En la flotación, se utiliza una amplia gama de reactivos químicos para modificar

---

las propiedades superficiales de los minerales valiosos y su respuesta de separación. Si bien se requieren reactivos de flotación para mejorar la recuperación y la ley del concentrado, muchos de ellos tienen importantes implicaciones ambientales [43].

#### 4) *Fase de Concentración*

Este proceso por gravedad es un método de recuperación el oro, en el que el material de alimentación pasa a través de un equipo y se recupera este metal según la fuerza gravitacional aplicada. Este método a menudo no proporciona altas recuperaciones de oro, especialmente para las partículas finas. El distanciamiento gravitacional se debe principalmente a la diferencia de peso y tamaño entre las diferentes partículas [44].

#### 5) *Fase de disposición final (Relaves mineros).*

Los relaves mineros se generan al final de todo el proceso minero y posteriormente se esparcen en depósitos o en los denominados relaves [45]. Los relaves mineros son diversos y sus propiedades dependen de los minerales que se extraen. Los relaves son producidos por la recuperación selectiva de los minerales. Las rocas que contienen minerales son trituradas y molidas, se someten a diferentes fases de procesos fisicoquímicos conocidos como recuperación o beneficio de minerales que son útiles para la industria y el ser humano [45].

#### 6) *Agua Residual.*

El agua residual generado en las plantas procesadoras de minerales contienen diversos contaminantes, como partículas sólidas, metales pesados y residuos de reactivos químicos. Para eliminar estos contaminantes, se emplean diferentes técnicas, como la coagulación y la floculación, las cuales permiten la separación de la fase sólida y líquida [46].

El agua residual producida durante el proceso de flotación abarca aguas de relaves, aguas concentradas y agua utilizada en el lavado del mineral crudo. Estas aguas concentradas se incluyen el sobrante de agua y el filtrado obtenido durante la deshidratación del concentrado, además suelen contener una variedad de reactivos de flotación, iones de metales pesados y partículas suspendidas, lo cual habitualmente dificulta su tratamiento y eliminación [47]. Es fundamental que los efluentes líquidos producidos en las plantas de procesamiento minerales se sometan a un tratamiento antes de ser descargados a un cuerpo de agua [26].

#### *D. Arsénico As*

El As, es un metaloide ubicuo y natural, está disperso en la corteza terrestre, en el suelo, agua, aire y las rocas [8]. Este elemento ingresa a las reservas de agua por procesos

---

naturales, como disoluciones minerales, erosión de rocas y empresas antropogénicas como la manufactura, minería y agricultura [29], posee características de metal como no metal. El As inorgánico es el más frecuente, no se puede destruir, puede reaccionar con el oxígeno y otros gases, el agua o el suelo para formar varios compuestos como el Arsenito (III), Arseniato (V) y monometilarsónico (MMA), el ácido dimetilarsónico (DMA), el ácido trimetilarsónico y la arsenobetaína [48].

El As se utiliza en semiconductores, cristalería, aleaciones y conservantes de madera y pesticidas [48]. Además, tiene aplicaciones medicinales, como en el tratamiento del linfoma, leucemia, sífilis, pian y la disentería amebiana, sin embargo, está clasificado como carcinógeno para humanos y animales ocasionando riesgo de tumores de vejiga, pulmón, riñones e hígado [49].

Las especies neutras de As (III) son más móviles y tóxicas que las especies aniónicas de As (V), y además la eliminación de As (III) es más difícil que la del As (V). Las especies de As trivalente, así como pentavalente, se encuentran principalmente en medios acuosos [5].

#### *1) Exposición al As*

La exposición al As se produce a partir de diferentes fuentes como suelo, aire y agua, se encuentra presente en altas concentraciones en acuíferos, depósitos naturales, actividades antropogénicas como las actividades metalúrgicas asociadas con la extracción de oro, plata y otros metales que se liberan al medio ambiente mediante la disolución de minerales [49].

En los humanos ocurre por vía oral, respiratoria o dérmica, la principal fuente de compuestos inorgánicos de As (III) y (V) es por exposición oral por el consumo de agua, productos agrícolas, ganaderos y pesqueros contaminados [48].

La exposición al As se asocia con el desarrollo de enfermedades vasculares, cerebrovasculares, cardiopatía isquémica y cáncer de diferentes órganos, según la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer y la Administración de Alimentos y Medicamentos. La toxicocinética del As depende de la duración de la exposición, la vía de ingestión, las características fisicoquímicas del compuesto y las especies biológicas afectadas [50].

#### *E. Electroquímica*

Las aplicaciones de la tecnología electroquímica en la remediación ambiental ha sido el foco de investigación durante las últimas tres décadas, para remediar problemas

---

ambientales que van desde el tratamiento de suelos contaminados hasta la eliminación de especies peligrosas de los desechos líquidos industriales [51].

La electroquímica es el método más práctico para la reducción de cationes de metales pesados y también puede diferenciar los metales pesados de los elementos nutrientes según sus potenciales de reducción [52], las técnicas asistidas electroquímicas han llamado la atención de los investigadores como procesos sostenibles y respetuosos con el medio ambiente [29].

#### 1) *Electrocoagulación (EC)*

La EC es un proceso que ha tratado diferentes aguas residuales de industrias textiles, alimento, metales pesados y aceites solubles [32], [53]. La EC es una técnica electroquímica que tiene como objetivo eliminar contaminantes inorgánicos y orgánicos existentes en un medio acuoso [54],[8], a través de varios procesos fisicoquímicos, eventos que utilizan corriente eléctrica [8] y un ánodo de sacrificio, permitiendo la producción y liberación de electrodos in situ del oxi-(hidróxido) un coagulante metálico [55], [51].

EC ha sido considerada una de las tecnologías verdes debido a su enfoque ambientalmente responsable para el tratamiento de aguas residuales en comparación con otros métodos tradicionales [56], debido a su versatilidad, eficiencia, bajo costo en caso de disponibilidad de material y posibilidad de automatización completa del proceso y compatibilidad ambiental [8], equipo simple, facilidad de operación, menos tiempo de tratamiento, uso de menos o ningún producto químico y menor cantidad de lodo [10], [57], evitando instalaciones sofisticadas en comparación con otros procesos [29].

Durante el proceso de EC, se utiliza corriente continua que fluye entre dos electrodos. En el ánodo, se producen iones  $Fe^{2+}$ , mientras que en el cátodo ocurre la descomposición del agua, generando iones  $H^+$  y  $OH$  [5].

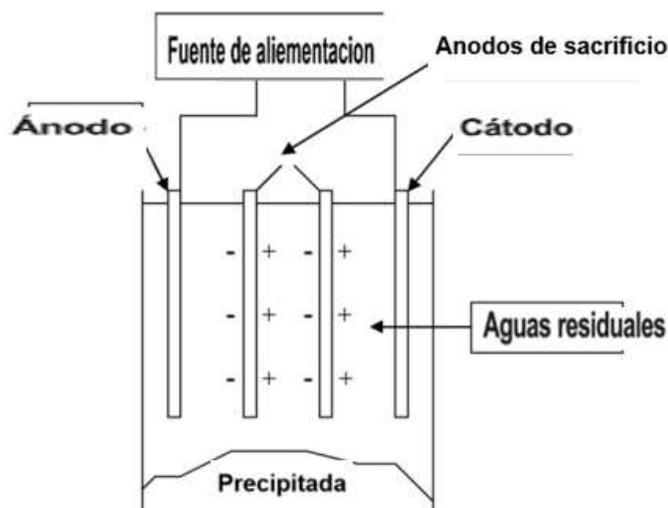


Fig. 1 Principio de la Electrocoagulación [32].

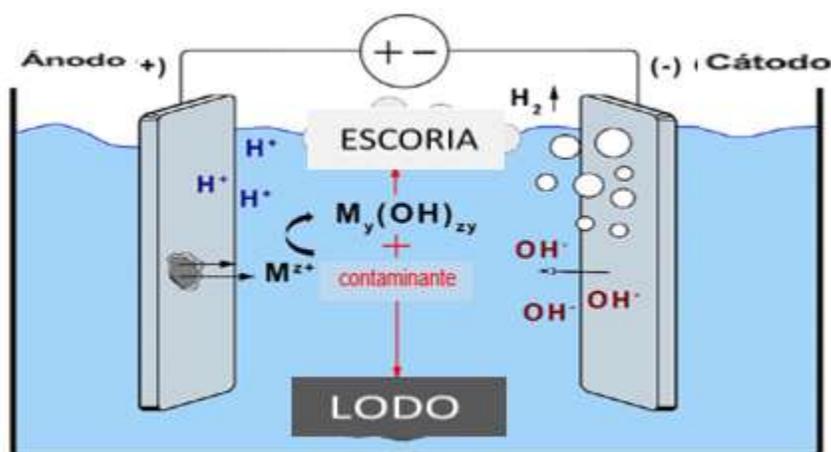


Fig. 2 Reacción química del proceso de electrocoagulación [8].

Para la eliminación de As utilizan electrodos metálicos de *Fe* o *Al* debido a su costo, y eficiencia de remoción [29], ofreciendo una alternativa viable para el tratamiento de As del agua residual [58], [55], [59].

Para una eliminación eficaz del As (III), es recomendable llevar a cabo la oxidación del As (III) a As (V), lo que se consigue fácilmente en el proceso de electrocoagulación [29], [8], [32] aplicando voltaje CC los ánodos se sacrifican para producir iones de  $Al^{+3}$  o  $Fe^{2+}$ , estos iones metálicos generados electroquímicamente son buenos coagulantes [32]. El arsenito se puede oxidar a arseniato durante la etapa de oxidación de iones ferrosos a férricos formando una especie intermediaria [8].

El mecanismo de eliminación de contaminantes en la EC implica la oxidación electroquímica del ánodo con la producción de iones coagulantes seguida de desestabilización y aglomeración para formar flóculos. El hidróxido metálico insoluble formado elimina el contaminante objetivo enredándolo en el flóculo formado [29]. Los hidróxidos de hierro ( $Fe(OH)^3$ ) son más estables en diferentes niveles de pH y tienen una mayor capacidad de atrapar el As en comparación con el hidróxido de aluminio [60], [61]. El agua se dosifica con iones metálicos disueltos a medida que pasa a través de la celda de electrocoagulación [59]. De este modo se genera la oxidación electrolítica del ánodo que se produce al aplicar la corriente continua [62].

## 2) Reacciones

Los iones que se liberan durante este proceso la electrocoagulación forman cadenas de poli hidróxidos. La formación de estos hidróxidos metálicos, la generación de los iones está acompañada de la concentración electroforética de partículas alrededor del electrodo, las cuales neutralizan su carga coagulando. La corriente aplicada obliga a los iones  $OH^-$  a migrar hacia el ánodo, por lo que el pH en la capa límite es más alto que en el resto de la solución, lo que favorece la formación de hidróxidos del metal del electrodo. El hidróxido formado remueve los contaminantes presentes en el agua por complicación o atracción electrostática [63].

Los iones  $Al^{3+}$  o  $Fe^{2+}$  son coagulantes muy eficientes para la floculación de partículas, por lo que en EC son frecuentemente utilizados electrodos de hierro o de aluminio. Los iones de aluminio hidrolizado pueden formar largas cadenas de  $Al-O-Al OH$  las cuales pueden adsorber químicamente una gran cantidad de contaminantes. El  $Al$  es normalmente usado para el tratamiento de agua potable y el hierro para el tratamiento de aguas residuales. En el caso del hierro, el  $Fe(OH)^3$  forma un coloide café rojizo y dependiendo del pH y de la disponibilidad de iones ferrosos, puede reaccionar con el oxígeno disuelto para dar  $Fe_3O_4$  [63].

Las reacciones químicas que se llevan a cabo en el ánodo son las siguientes:

- Para ánodo de aluminio:



- En condiciones alcalinas:



- En condiciones acidas:



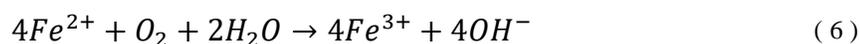
- Para ánodo de hierro:



- En condiciones alcalinas:



- En condiciones acidas:



La electrolisis del agua produce oxígeno e hidrogeno de la siguiente forma:

- En el ánodo:



- En el cátodo es:



### 3) *Procesos de remoción de As mediante electrocoagulación*

Para determinar la eficiencia de remoción de *As* en el proceso EC depende en gran medida de diversos factores, entre ellos la conductividad eléctrica aplicada, tipo y diseño del electrodo, el tipo de contaminante, pH inicial, duración de reacción, espacio entre electrodos, la conexión del electrodo y la temperatura [8], [60], [64].

#### 4) *pH*

El pH es una variable muy importante que se debe considerar durante el proceso de remoción de *As* en aguas industriales de procesos mineros hidrometalúrgicos [57]. El pH afecta principalmente en la especiación de agentes coagulantes y contaminantes, liberando iones de hidróxidos, permitiendo la eliminación de *As* [8]. La EC usa ánodos de *Al* y *Fe* para la eliminación selectiva de contaminantes, ya que la especiación de los iones de aluminio, ferroso y férrico depende del pH. Varias formas de iones ferrosos son dominantes en diferentes rangos de pH [29].

Para la eliminación de Arsenito a Arseniato se recomienda utilizar un rango del pH de 6 a 10 con electrodos de *Fe* que es más eficiente que los electrodos de *Al* [60].

El *As* se oxida más fácilmente de *As* trivalente (III) a *As* pentavalente (V) en un rango de pH entre 6 y 9, sin embargo, diversas investigaciones han demostrado que el pH ideal para la máxima eliminación de *As* oscila entre 7 y 8.5. No obstante, algunos estudios han

evidenciado que un pH ligeramente ácido en un rango de 4 y 5 es adecuado para eliminar As usando electrodos de aluminio [8], [65].

a) *Diagrama Eh-pH para As*

El potencial redox (Eh) es una medida fundamental en el tratamiento de aguas, ya que determina la forma química predominante del As. Al ser más fácil eliminar el As<sup>5+</sup> que el As<sup>3+</sup>, el control del Eh es crucial para optimizar los procesos de depuración [66].

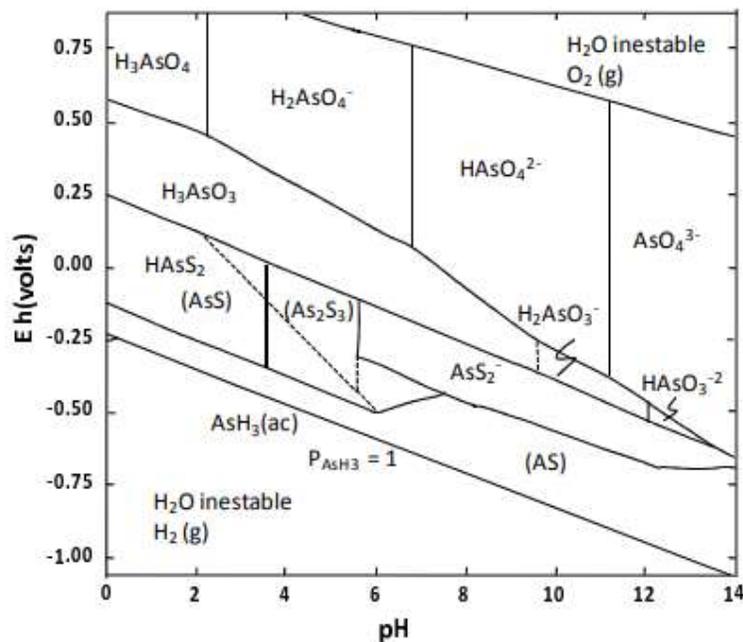


Fig. 3 Diagrama Eh-pH para arsénico a 25 °C y 101.3 KPa (Según Wang & Mulligan 2006) [62].

5) *Tiempo de electrólisis*

El tiempo de electrólisis tiene influencia en la cantidad de iones de *Fe* y *Al* liberado en un sistema electroquímico. Estos iones, en forma de hidróxidos de *Fe/Al*, se generan en grandes cantidades y pueden facilitar la rápida eliminación de contaminantes [8], [67].

Es crucial optimizar el tiempo de electrólisis para minimizar los costos de este proceso. Sin embargo, un tiempo de electrólisis excesivo puede producir en exceso iones metálicos, esto puede afectar negativamente la calidad del agua y, en algunos casos, incluso representar un riesgo para la salud humana [8].

Debe existir una relación importante entre la densidad de corriente aplicada y el tiempo de electrocoagulación en la eliminación de *As*, de este modo una densidad de corriente ponderada con un tiempo de operación más prolongado mejora la eficiencia [8].

---

## 6) Flujo

### a) Proceso continuo

Diversas investigaciones experimentales han demostrado la eficiencia de remoción de As de aproximadamente del 94% del agua potable y subterránea mediante un reactor EC de flujo vertical continuo que utiliza dos electrodos de placas híbridas de *Fe* y *Al* [68].

En el modo de operación continua, para un volumen fijo, se encontró que cuanto mayor sea el caudal, menor será el tiempo de residencia. EL proceso EC utilizando un reactor horizontal de flujo continuo y evaluó el efecto de tasa de flujo sobre la eficiencia de eliminación de As [16].

Se realizaron diversos experimentos en un reactor EC de flujo continuo horizontal utilizando electrodos de hierro bipolares paralelos para eliminar el As del agua subterránea donde que se pudo eliminar el 96% de As. Los resultados de estos experimentos proporcionan información valiosa sobre la eficiencia de la EC para este fin [8], [60].

### b) Proceso discontinuo

El reactor electroquímico discontinuo abierto con electrodos de placas paralelas es una opción simple y económica para el tratamiento de pequeñas cantidades de solución. Sin embargo, no es la opción más eficiente para todas las aplicaciones [8].

Así mismo los reactores discontinuos de tipo cilíndrico con electrodos concéntricos ofrecen mayor eficiencia y control que el reactor discontinuo abierto con electrodos de placas paralelas. Sin embargo, son más costosos y complejos de construir y mantener [8].

Con modo de flujo discontinuo con placas metálicas de *Al* se tiene un eficiencia favorable para eliminación de As [60].

### c) Densidad de corriente

La potencialidad de la corriente eléctrica aplicada influye directamente en la generación de iones metálicos liberados del ánodo y en la rapidez con la que se forman microburbujas de gas en el cátodo durante el proceso de electrólisis. Por lo tanto, la densidad de corriente juega un papel crucial en la remoción de As en aguas residuales a través de la EC en tratamientos de aguas o medios acuosos [69], [8].

La conexión directa entre la magnitud de la corriente utilizada y velocidad de producción del coagulante se debe a la disolución del ánodo que libera iones de hidróxido en

la solución, sin embargo, el tiempo de reacción y la corriente aplicada son dos factores muy importantes que influyen el proceso de la EC [60].

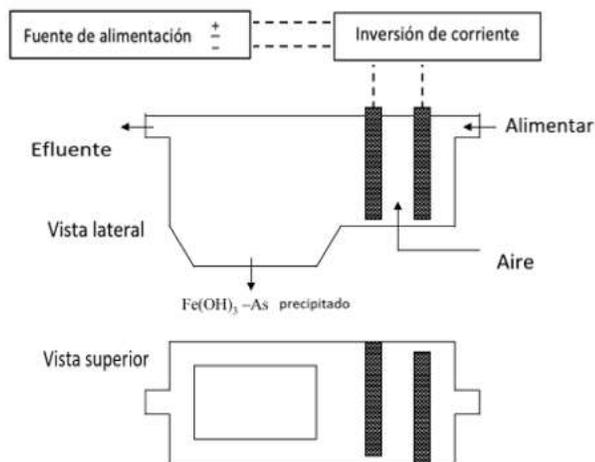


Fig. 4 Modelo experimental del proceso de electrocoagulación [32].

#### F. Equipo T-NEC-2000

NEC-2000 es un equipo con tecnología alemana diseñado para el tratamiento de agua superficiales y subterráneas manejando varios volúmenes y flujos de agua por hora, sus medidas son de 200x 215x 115 mm, cuenta con 5 placas de 5 mm, cuenta con una fuente de alimentación de 85-264 VAC, voltaje al electrodo máximo de 24 voltios; 50/60 Hertz y una potencia requerida de máximo 36 vatios dependiendo de la eficacia preajustada y de la conductividad del agua [70].



Fig. 5 Equipo electroquímico NEC-2000 [70].

El sistema NEC-2000, sucesor del modelo NEC-4000, destaca por su preciso control de la eficiencia del electrodo, un alto voltaje de salida y la capacidad de operar a presiones de agua de hasta 16 bar. La célula de tratamiento, con certificación WRAS, garantiza su

seguridad para el contacto con agua potable. Además, cuenta con una fuente de alimentación integrada y versátil, que permite ajustarlo a diferentes condiciones de voltaje y frecuencia. Su funcionamiento es altamente configurable gracias a selectores BCD que permiten ajustar tanto la intensidad de corriente como el tiempo de operación del electrodo.

### 1) Celda electroquímica

La celda electrolítica es un elemento fundamental dentro del proceso de electrocoagulación, esta celda está compuesta por dos electrodos: un ánodo, responsable para que se dé la oxidación del metal, y un cátodo, donde se lleva a cabo la reducción de diversos componentes electrolíticos. Una vez que se logra el equilibrio de estas cargas, los procesos físico-químicos encargados de mantener las partículas en suspensión se detienen, indicando el inicio del proceso de coagulación [71].

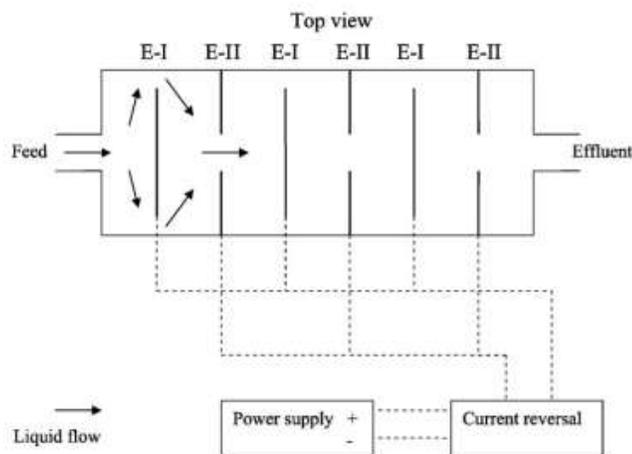


Fig. 6 Celda de electrocoagulación vista superior [32].

Este diseño del reactor EC incluye electrodos metálicos que actúan como un ánodo y un cátodo cada uno. Una vez que se les aplica corriente eléctrica a los electrodos, inicia el proceso de oxidación en el ánodo y, en consecuencia, se generan cationes metálicos. Estas especies chocan, dando como resultado flóculos adsorbentes, más grandes y de rápido crecimiento que inducen la eliminación de contaminantes  $As$ , debido a que los contaminantes inorgánicos son atraídos por los electrodos que están bajo el efecto de electroforesis es decir que la presencia o el contacto con un campo eléctrico se da migración de aniones [8].

---

## *G. Marco Legal*

### *1) Constitución de la República del Ecuador*

El Art 14 se contempla el derecho que tiene la población a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, que garantice la sostenibilidad y el buen vivir, *sumak kawsay* [72].

El capítulo VII el Art 71 el derecho a la naturaleza, que se respete integralmente su existencia y el mantenimiento y regeneración de sus ciclos vitales; en los casos de impacto ambiental grave o permanente, incluidos los ocasionados por la explotación de los recursos naturales no renovables, el Estado establecerá los mecanismos más eficaces para alcanzar la restauración, y adoptará las medidas adecuadas para eliminar o mitigar las consecuencias ambientales nocivas [72].

### *2) Ley Minera*

En el Título IV y Capítulo II manifiesta el Art.79 los titulares mineros y mineros artesanales que utilicen aguas para el desarrollo de sus trabajos y procesos, deben devolverlas al cauce original del río o cuenca de donde fueron tomadas, libres de contaminantes que deben cumplir con límites permisibles establecidos en la normativa ambiental y del agua, con la finalidad que no afecte al medio ambiente y al ser humano [73].

### *3) Reglamento Ambiental de Actividades Mineras, Ministerio del Ambiente*

En el capítulo VI se exponen en los Art. 84 sobre la gestión del agua, que tienen correlación en el ámbito de la minería con respecto a las plantas de procesadoras de mineral aurífero en la reducción de su uso, recirculación del agua y/o tratamiento, además en el Art. 85 sobre el manejo de desechos en los procesos mineros que generen descargas deben realizar su debido tratamiento de aguas cumplimiento los límites máximos permisible establecidos en la normativa vigente [31].

### *4) Acuerdo Ministerial 097-A Reforma Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente.*

#### *a) Norma de Calidad Ambiental y Descargas de Efluentes: Recurso Agua.*

Esta norma técnica ambiental establece el enfoque general sobre la prevención y control de contaminación ambiental con sus respectivos límites máximos permisibles de los parámetros de la descarga a un cuerpo de agua dulce, en este caso es el As (As). En el libro VI, anexo I en la Tabla 9 límites de descarga a un cuerpo de agua dulce [74].

TABLA I  
LÍMITES DE DESCARGA A UN CUERPO DE AGUA DULCE [74].

<b>Parámetros</b>	<b>Expresado como</b>	<b>Unidad</b>	<b>Límite máximo permisible</b>
Aceitas y Grasas	Sust. Solubles en hexano	mg/L	30,0
Alkil Mercurio		mg/L	No detectable
Aluminio	Al	mg/L	5,0
As Total	As	mg/L	0,1
Bario	Ba	mg/L	2,0
Boro Total	B	mg/L	2,0
Cadmio	Cd	mg/L	0,02
Cianuro Total	CN	mg/L	0,1
Cinc	Zn	mg/L	5,0
Cloro Activo	Cl	mg/L	0,5
Cloroformo	Ext. Carbón cloroformo ECC	mg/L	0,1
Cloruros	Cl	mg/L	1000
Cobre	Cu	mg/L	1,0
Cobalto	Co	mg/L	0,5

## VII. METODOLOGÍA

La presente investigación es experimental y se analizaron variables dependientes (porcentaje de remoción de  $As$ ), independientes (pH y tiempo) para remover  $As$ .

La técnica empleada es la electrocoagulación, es un proceso electroquímico para tratar aguas residuales aplicando corriente eléctrica que se pasa través de sus electrodos de  $Fe$ .

### A. Recolección de la muestra de agua residual de proceso minero hidrometalúrgico

Se recolectó, etiquetó y almacenó, 20 L de agua residual hidrometalúrgico del proceso de flotación de una planta de beneficio ubicado en el cantón Ponce Enríquez de la provincia del Azuay; y se caracterizó y proceso la remoción del  $As$  en el laboratorio de “Aplicaciones Electroanalíticas y Bioenergía” de la facultad de Ciencias Químicas y de la Salud de la Universidad Técnica de Machala.



Fig. 7. Mapa de ubicación de la toma de muestra

TABLA II  
PUNTO DE LA TOMA DE MUESTRA

Punto	Este (X)	Norte (Y)
1	642391	9658200

### B. Caracterización fisicoquímica de la muestra

Se caracterizó la muestra de agua residual hidrometalúrgico mediante la técnica Espectrometría de absorción atómica para conocer la concentración inicial de arsénico y otros indicadores que pueden influir durante el proceso de remoción como el *Fe* y *Al*. Adicionalmente, se analizaron parámetros como el pH, temperatura y densidad referencia al Stantdar Methods [75].

### C. Ajuste de variables críticas para la remoción de arsénico

Para la remoción de *As* se tomó como referencia la metodología de Velez et al. [76], que utiliza la técnica de electrocoagulación, con modificaciones de pH 2, 4 y 8, en un tiempo de 2,5 horas de electrólisis para remover 2 ppm de arsénico (*As*) en agua residual hidrometalúrgica.

En el presente diseño experimental, se utilizó agua sintética con arsénico a una concentración de 2 ppm, ajustando variables críticas como pH y tiempo en tres ensayos (E1, E2, E3) en un flujo constante de 12,3 ml/min y una corriente aplicada de 7 miliamperio, para una mejor eficiencia en el proceso de remoción de *As*. A continuación, en la **TABLA III** y **IV** se presenta las condiciones de operación para el diseño experimental de pH y tiempo:

TABLA III  
CONDICIONES DE OPERACIÓN EN AGUA SINTÉTICA PARA EL DISEÑO

Ensayo	pH	Tiempo (min)	%Remoción As
E1	4	30	R1
E1	4	60	R2
E1	4	90	R3
E2	8	30	R4
E2	8	60	R5
E2	8	90	R6
E3	12	30	R7
E3	12	60	R8
E3	12	90	R9

Con el mejor pH obtenido de porcentaje de remoción de arsénico, se procederá a evaluar la remoción agua residual hidrometalúrgico recolectada para optimizar el mismo.

TABLA IV  
CONDICIONES DE OPERACIÓN PARA EL DISEÑO

pH	Tiempo (min)	%Remoción As
pH	30	R10
pH	60	R11
pH	90	R12

*D. Proceso de remoción por electrocoagulación*

En cada ensayo (E1, E2, E3) se modificó el pH inicial del agua sintética utilizando hidróxido de Sodio (*NaOH*) para obtener un pH básico o alcalino, así mismo, para un pH ácido se usó ácido clorhídrico (*HCl*). En el proceso de remoción por electrocoagulación se colocó 5000 mL de agua modificada en un recipiente de plástico, previamente esterilizado, seguidamente se introdujo una manguera al recipiente para succionar el agua sintética a través de una bomba peristáltica. El agua sintética mantiene su flujo constante y se transporta a los electrodos del equipo T-NEC.

Una vez que el agua residual circula por las celdas electroquímicas del equipo antes mencionado, se forma flóculos que atraen al As III y lo oxidan a As V, siendo este más sólido y menos tóxico donde inmediatamente el agua procesada se transporta a un filtro de agua para retener las partículas de As V.

Durante el tiempo de electrólisis de cada ensayo (E1, E2, E3), se tomaron muestras de agua sintética cada 30 minutos y se analizó la concentración final de arsénico a través del Test de Arsénico (Lovibond Water Testing) el fin de determinar el porcentaje óptimo de remoción de arsénico en el agua residual hidrometalúrgica. A continuación, se presenta la ecuación para calcular el porcentaje de remoción de arsénico:

Cálculo:

$$\%R = \frac{Ci - Cf}{Ci} * 100 \quad (9)$$

Donde;

*Ci*: Concentración inicial

*Cf*: Concentración final

*%R*: Porcentaje de Remoción

### E. Límites máximos permisibles de arsénico

Una vez obtenido los resultados de las experimentaciones, se comparó la concentración final del arsénico de cada muestra con la Tabla 9. Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce del acuerdo ministerial 097-A.

### F. Diagrama de Flujo del Proceso

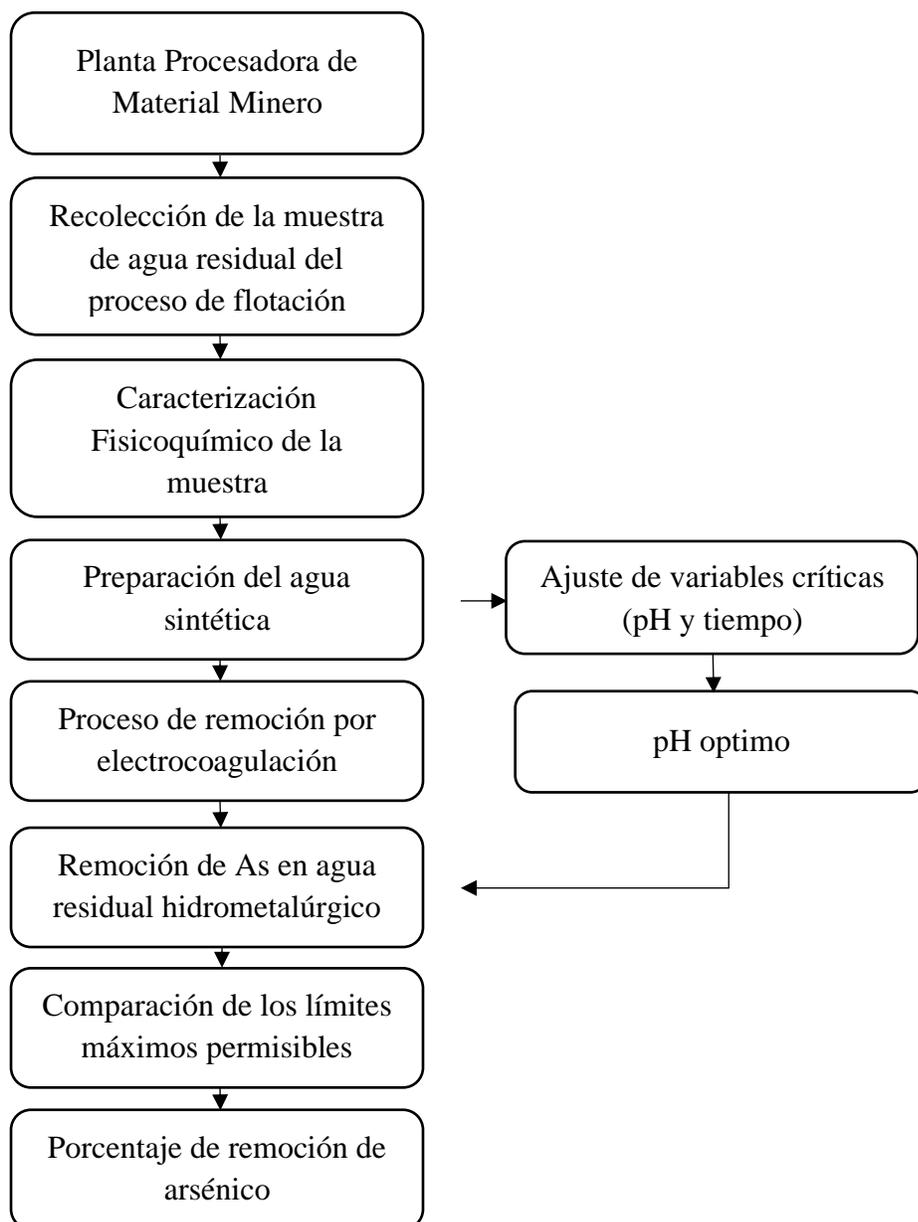


Fig. 8. Diagrama de flujo del proceso de remoción de arsénico por electrocoagulación

## VIII. RESULTADOS

### A. Análisis físico-químico de agua residual hidrometalúrgica

En la **TABLA V**, se presenta la caracterización fisicoquímica de la muestra residual recolectada en el proceso de flotación de la planta de beneficio, tomando como referencia el Standar Methods.

TABLA V  
RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA LA MUESTRA RECOLECTADA

Arsénico (mg/L)	Hierro (mg/L)	Aluminio (mg/L)	pH	Temperatura (°C)
2,0508	>3,00	>0,50	7	26,4

Los parámetros más significativos son el arsénico y pH, que obtuvieron valores como 2,05 mg/L y 7, respectivamente, sin embargo, los demás parámetros son complementarios que pueden influir o afectar en el proceso de electrocoagulación.

### B. Ensayos de laboratorio del agua sintética y agua residual hidrometalúrgica

Se analizó el agua sintética y agua residual con el Test de Arsénico (Lovibond Water Testing) y el mejor tiempo que remoción de arsénico se caracterizó en laboratorio Ambiental y Ocupacional “AGUIBULAB”. A continuación, en la **TABLA VI** y **VII**, se presenta los resultados de arsénico en agua residual y agua sintética.

TABLA VI  
RESULTADOS DE REMOCIÓN DE ARSÉNICO EN AGUA SINTENTICA

pH	Tiempo (min)	Lovibond Water Testing	Laboratorio AGUIBULAB
		As (mg/L)	As (mg/L)
4	30	0,25	0,1238
	60	0,25	
	90	0,10	
8	30	0,25	0,0605
	60	0,10	
	90	0,05	
12	30	0,50	0,2342
	60	0,50	
	90	0,25	

Los resultados de Test de Arsénico demuestran que, para el pH 4, 8 y 12 obtuvieron la mayor remoción en el minuto 90 con valores de 0.10, 0.05 y 0.25 mg/L de As, respectivamente. Así mismo, dichos resultados se contrastan con los ensayos de laboratorio alcanzando remociones de 0.1238, 0.0605 y 0.2342 mg/L As, respectivamente. El mejor rendimiento de remoción de arsénico en agua sintética, se obtuvo en el pH 8 durante los 90 minutos de electrocoagulación, por lo cual se aplicó el mismo método con el agua residual hidrometalúrgica, así como se presenta en la siguiente tabla:

TABLA VII  
RESULTADOS DE REMOCIÓN DE ARSÉNICO EN AGUA RESIDUAL HIDROMETALÚRGICA

pH	Tiempo (min)	Lovibond	Laboratorio
		Water Testing	AGUIBULAB
		As (mg/L)	As (mg/L)
8	30	0,50	0,0917
	60	0,25	
	90	0,10	

En el agua residual hidrometalúrgica, se produjo su mejor remoción de arsénico en el minuto 90 logrando una eliminación de 0.10 mg/L según el Test y en el ensayo de laboratorio se obtuvo una remoción de 0.0917 mg/L de As.

### C. Porcentaje de remoción de arsénico

Se evaluó el porcentaje de remoción de arsénico de agua sintética en cada experimentación (E1, E2, E3) para maximizar el mejor rendimiento de remoción de arsénico en el agua residual hidrometalúrgica recolectada. En las (**Fig. 9, 10 y 11**) se presentan tres experimentaciones con agua sintética en condiciones de pH 4, 8 y 12 en un flujo constante de 15 mL/min, durante un tiempo de remoción de 90 min.

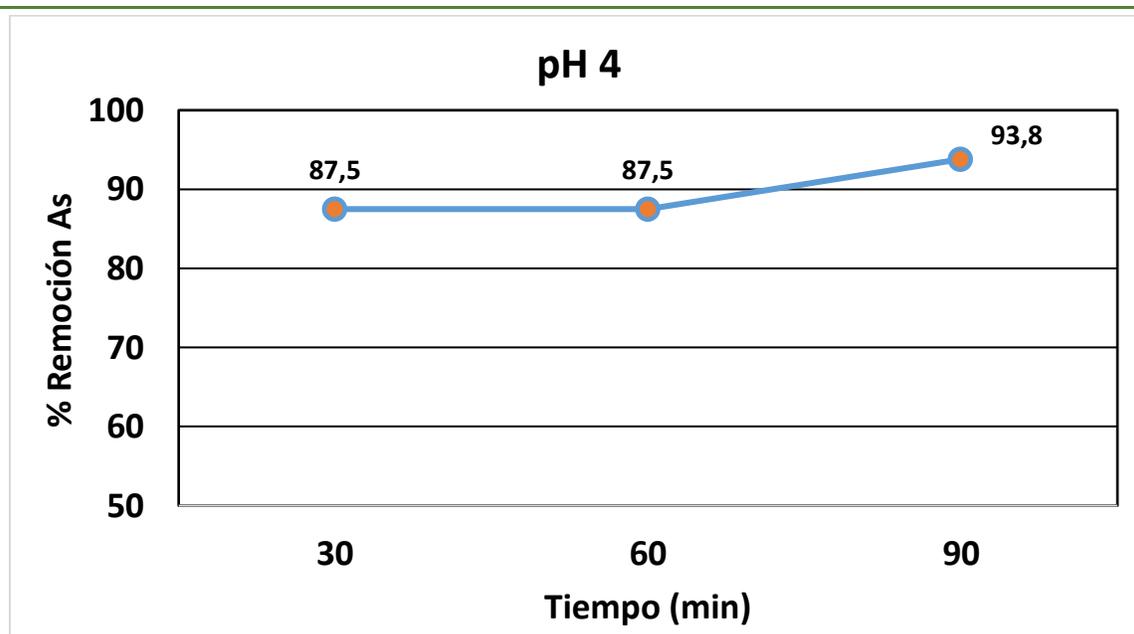


Fig. 9 Porcentaje de remoción de As en agua sintética a pH 4

Según los resultados presentados en la (**Fig. 9**), se observa que en el tiempo de 30 y 60 minutos de electrocoagulación se removió 87,5 % de As en el agua sintética, mientras que el mayor rendimiento de remoción de As se produjo en el minuto 90 con un 93,8 % en un pH de 4.

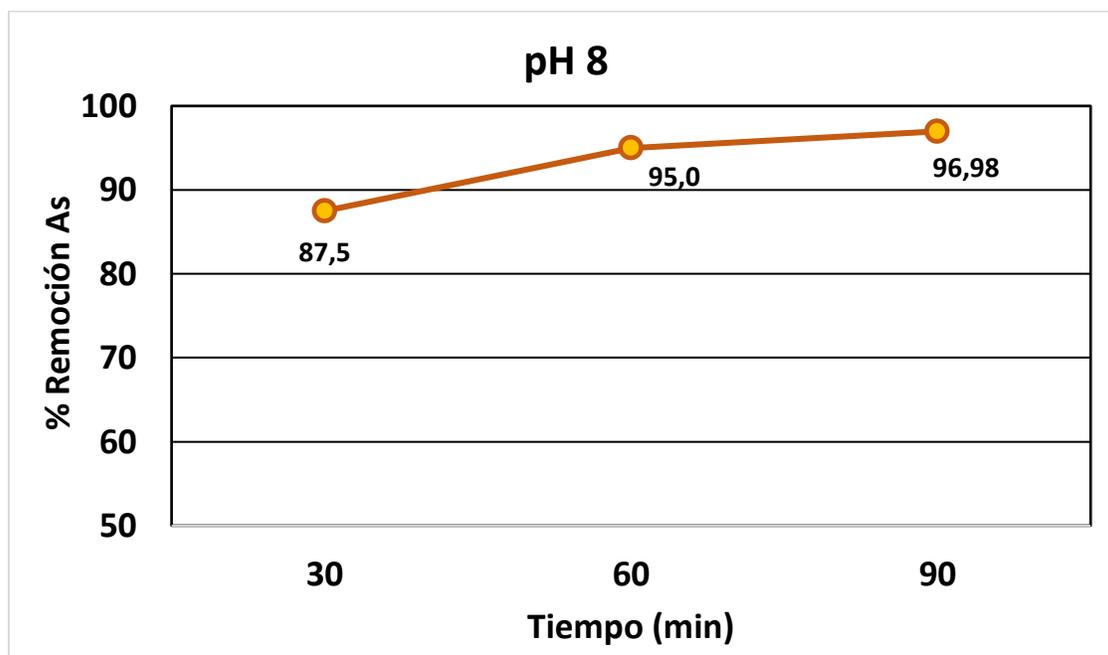


Fig. 10 Porcentaje de remoción de As en agua sintética a pH 8

En la (**Fig. 10**), se muestra un aumento del porcentaje de remoción de arsénico en función del tiempo de electrocoagulación en pH de 8, iniciando su crecimiento en el minuto 30 con un valor de 87,50 % de As, seguidamente en el minuto 60 obtiene un 95,0 % y termina alcanzando positivamente para el minuto 90 un total de 96,98 % de remoción de As.

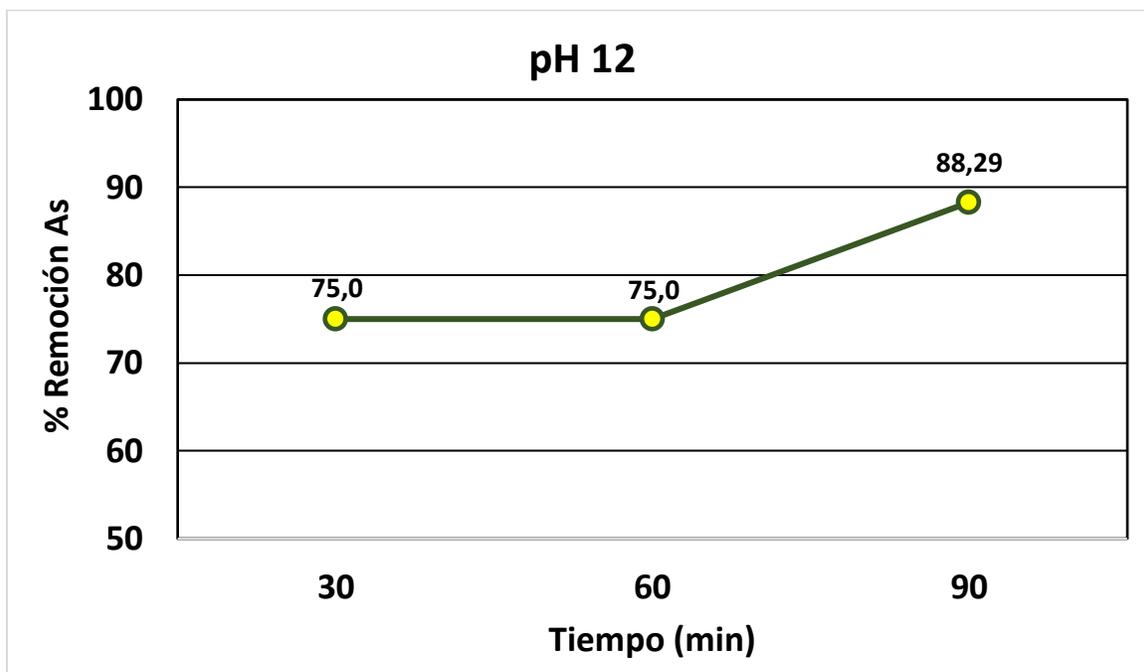


Fig. 11 Porcentaje de remoción de As en agua sintética a pH 12

Por otro lado, en la (**Fig. 11**) se observa que en el minuto 30 y 60 mantuvo un porcentaje de remoción de As constante del 75,0 %, mientras que para el minuto 90 hubo un aumento positivo de remoción de arsénico equivalente a un valor de 88,29 %. A continuación, en la (**Fig.10**) se detallan el porcentaje de remoción de arsénico del agua sintética de los tratamientos aplicados.

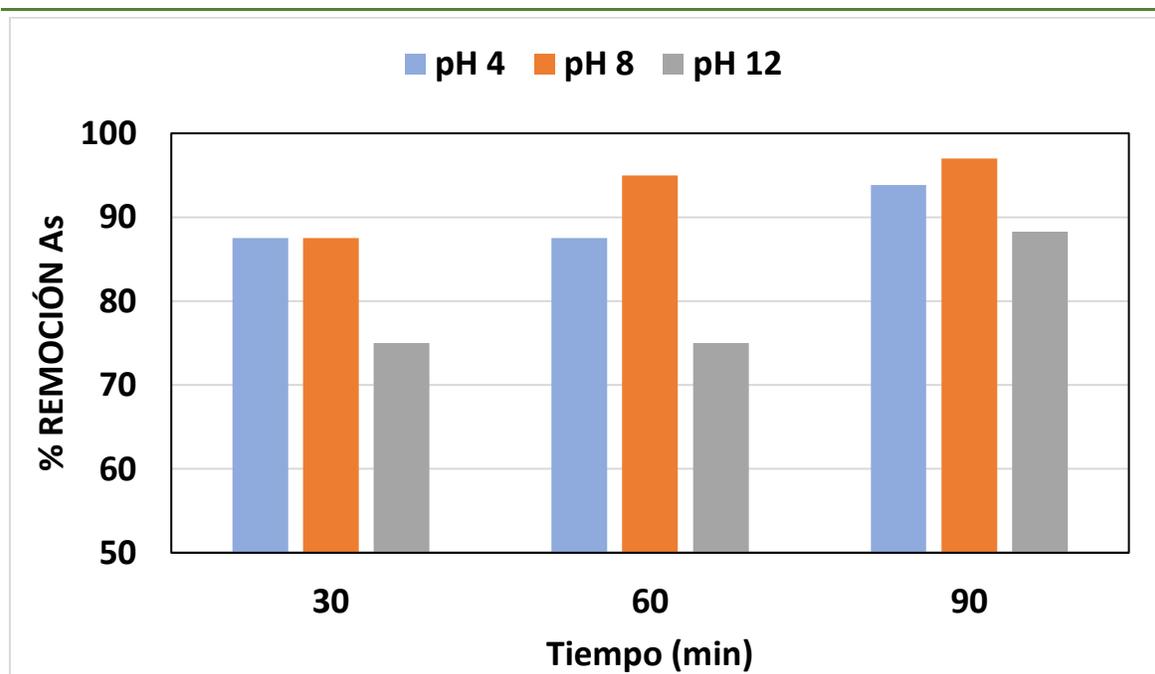


Fig. 12 Porcentaje de remoción de arsénico en agua sintética en las tres experimentaciones.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el pH 8 generó mayor porcentaje de remoción de arsénico en los minutos 30, 60 y 90 de electrocoagulación con un valor promedio de 93,33 %, mientras que el pH 4 y 12 alcanzaron un valor promedio de 90 % y 79,17 % de remoción de *As*, respectivamente.

Una vez conseguido el pH óptimo, en la (**Fig.12**) se presenta el porcentaje de remoción de *As* en el agua residual hidrometalúrgica en un pH de 8 durante 90 minutos de electrocoagulación en una concentración inicial de 2.0508 de *As*.

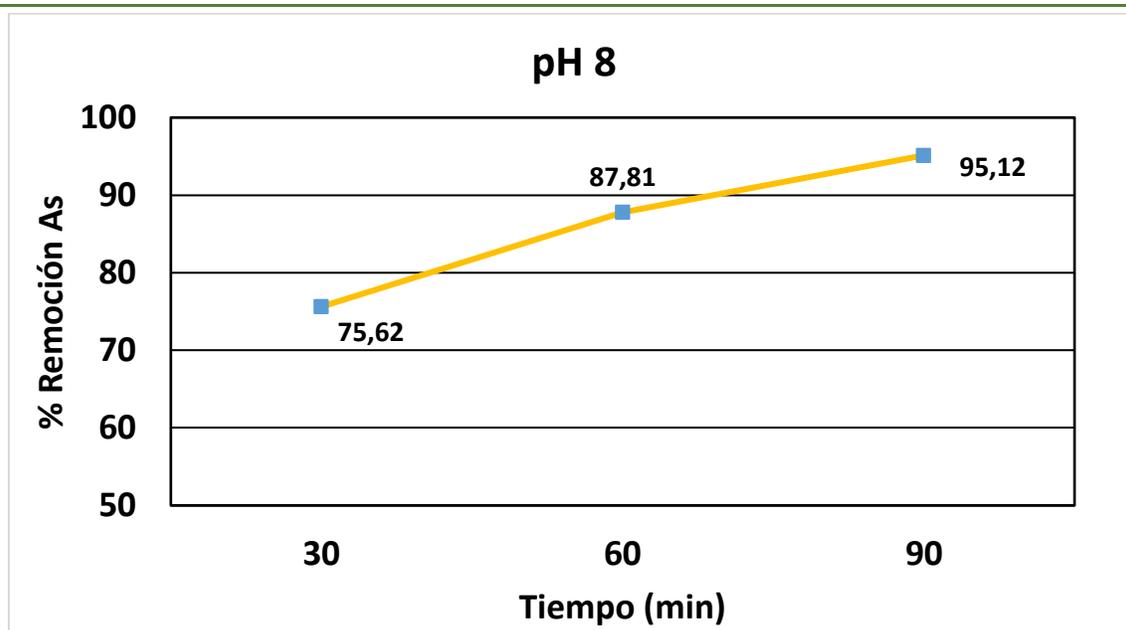


Fig. 13 Porcentaje de remoción de As en agua residual hidrometalúrgica a pH 8

En la (**Fig. 13**) la línea demuestra como el porcentaje de remoción de arsénico en el agua residual hidrometalúrgica aumenta en función del tiempo, obteniendo un valor de 75,62 % de remoción As en el minuto 30, luego en el minuto 60 aumenta positivamente el porcentaje de remoción de As del 87,81 % y finalmente en el minuto 90 alcanza su máximo porcentaje de remoción del 95,12 % de As en agua residual hidrometalúrgica.

*D. Análisis comparativo de los límites máximos permisibles establecidos en el acuerdo ministerial 097-A*

Con base a los resultados de la remoción de arsénico del agua residual hidrometalúrgica en un pH de 8, se procedió a comparar los tres tiempos de remoción con los límites máximos permisibles estipulados en la Tabla 9. Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce del acuerdo ministerial 097-A. A continuación, en la **TABLA VIII**, se muestra la comparación de los resultados con los límites máximos permisibles.

TABLA VIII

COMPARACIÓN DEL AGUA RESIDUAL HIDROMETALÚRGICA REMOVIDA EN UN PH DE 8 CON LOS LIMITES MAXIMOS PERMISIBLES DEL ACUERDO MINISTERIAL 097-A

Tiempo (min)	Resultados de Arsénico (mg/L)	Límite Máximo Permisible
30	0.50	0.10
60	0.25	0.10
90	0.09	0.10

El resultado en el minuto 30 y 60 de remoción de *As*, indica que no se encuentra dentro de los límites máximos permisibles obteniendo un valor de 0.50 y 0.25 mg/L *As*, respectivamente. Por otra parte, en el minuto 90 de tratamiento, si se encuentra dentro del límite máximo permisible con un total de 0.09 mg/L, según lo estipulado en el acuerdo ministerial 097-A.

---

## IX. DISCUSIÓN

En el presente estudio experimental, la técnica de electrocoagulación mejor resultado obtenido fue con un pH 8 en 90 minutos que alcanzó el mayor porcentaje de remoción de As 95,12% en agua residual hidrometalúrgica en este mismo pH, se realizó en 30 y 60 minutos, y se removió un porcentaje de 75,62 y 87,81%, respectivamente.

Según Velez [71], informa, que, en un tiempo de electrolisis de 150 minutos, el pH 4 es óptimo para la eliminación de As, que se representa con el 91,90 % y los rangos menos eficientes son el pH 2 y 8 con 82,86 y 80,95% que en un pH 8, alcanzó el mayor porcentaje de remoción del 95,12 % de As en agua residual hidrometalúrgica, en 90 minutos de electrocoagulación, mientras que en el minuto 30 y 60 se removió un porcentaje de 75,62 y 87,81, respectivamente. Según Velez [71], informa que, en un tiempo de electrolisis de 150 minutos, el pH 4 es óptimo para la eliminación de As, que se representa con el 91,90 % y los rangos menos eficientes son el pH 2 y 8 con 82,86 y 80,95%, respectivamente.

Otro estudio más reciente de Nyangi [67], propuso varios análisis experimentales y eligió las condiciones óptimas utilizando electrodos de hierro, el pH fue de 5,5 con un 98,9 % en un periodo de 17 minutos, sin embargo, con electrodos de aluminio se sugiere un pH de 6,6 con un 92,7 % en un tiempo de 20 minutos. Este estudio recomienda la utilización de electrodos de hierro para la remoción de As en agua contaminada en comparación a los electrodos de aluminio mediante la técnica de electrocoagulación.

De acuerdo con Gilhotra *et al.* [61], obtuvo la eficiencia máxima de eliminación de As del 99,6% en un pH de 5,2 en 20 minutos y la eficiencia mínima de eliminación de As del 92% se logró a pH 4 en un tiempo de tratamiento de 8 minutos, es decir, los pH óptimos están en un rango entre 5 y 8. Por otro lado, Kumar *et al.* [65], demostró que la eliminación de arsénico fue superior al 99% por un tiempo de 70 minutos, en un pH de 7.

Según el estudio experimental de Kobya *et al.* [59], plantea que cuando se utilizan placas de hierro su eficiencia de eliminación es de 93,5 % en un pH 6,5 en un tiempo de 12 minutos y Sandoval *et al.* [3], menciona que en un pH ligeramente ácido entre 4 y 5 es ideal para la eliminación de As utilizando electrodos de Al.

En una revisión realizada por Patidar *et al.* [64], ratifica que la eficiencia de eliminación de 99,6 % de arsénico, fue a un valor de pH de 2,4 en electrodo de hierro con un

---

tiempo de tratamiento de 60 minutos, concluyen, que a medida que aumenta el tiempo de tratamiento, también aumenta la eliminación de arsénico.

Según Sik *et al.* [10], nos indica que la eliminación de *As* no fue considerable en un rango de pH 6 y 9, sin embargo, la remoción máxima que se dio fue a pH 7,5 con el 95,8 % en un periodo de 14 minutos usando electrodos de *Fe*, mientras que Khan *et al.* [29] nos menciona en su análisis de estudio se logró las condiciones óptimas en la eliminación de *As* a un pH 7 con alrededor del 95 % en 2 minutos.

Según Gómez *et al.* [58], en su estudio mostro que más del 99,6% de *As* se elimina usando electrodos de *Fe-Fe*, sus resultados variaron del 78,9% a más del 99,6% en diferentes niveles iniciales de *As* (1,42- 123,0 ppm). Por otro lado, al usar placas de *Al* la eficiencia de eliminación independiente no supero el 78,9%, después de 1h de tiempo de resistencia. Es decir que este autor demostró que la utilización de placas de *Fe-Fe* o una combinación de *Fe-Al*, sus resultados son favorables para la eliminación de *As*, también demostró que el aumento de tiempo de resistencia mejora la eficiencia de remoción de *As*. Indica que observó una fuerte retención de *As* en las placas de *Al-Al* en los rangos de pH de 3 a 7. En el caso de las placas de *Fe-Fe* se determinó que el pH 6 es el indicado para la remoción máxima de *As*. Gómez supone que, a un pH más bajo o más alto, la tasa de formación de complejos metal-arseniato/ arsenito puede ser menos debido a los efectos de la solubilidad que a un pH 6, sin embargo, menciona que explorará este asunto en futuras investigaciones.

En ese contexto, Núñez *et al.* [53], afirma que las aguas residuales son difíciles de tratar con cualquiera de los métodos, solo se eliminan pequeñas cantidades de *As* y esto se debe al pH bajo y presencia de otras especies como sulfatos en grandes cantidades.

---

## X. CONCLUSIONES

- Se caracterizó fisicoquímicamente el agua residual hidrometalúrgica con la técnica Espectrometría de absorción atómica y Standar Methods. De acuerdo con los resultados se registró 2,0508 mg/L *As*, >3,00 mg/L *Fe*, >0,50 mg/L, 7 pH y 26,4 °C de temperatura.
- Se ajustaron variables críticas como pH y tiempo para mejorar el rendimiento de remoción de *As*. Las experimentaciones fueron acondicionadas a pH de 4, 8 y 12 en tiempos de 30, 60 y 90 minutos, para cada pH, con un flujo constante de 12,3 ml/min.
- Se determinó el mejor porcentaje de remoción de *As* del agua sintética y agua residual hidrometalúrgica, el cual el pH 8 generó mayor porcentaje de remoción de *As* en agua sintética en los minutos 30, 60 y 90 de electrocoagulación con un valor promedio de 93,33 %, mientras que el pH 4 y 12 alcanzaron un valor promedio de 90 % y 79,17 % de remoción de *As*, respectivamente. Por otro lado, el porcentaje de remoción de *As* en el agua residual hidrometalúrgica aumentó en función del tiempo, obteniendo un valor de 75,62 % de remoción *As* en el minuto 30, luego en el minuto 60 aumenta positivamente el porcentaje de remoción de *As* en un total de 87,81 % y finalmente en el minuto 90 alcanza su máximo porcentaje de remoción del 95,50 % de *As* en agua residual hidrometalúrgica.
- Para finalizar se efectuó un análisis comparativo de los resultados obtenidos del proceso de remoción del agua residual hidrometalúrgica con Tabla 9 del Anexo 1 del libro V1 del TULSMA (acuerdo ministerial 097-A). Según los resultados en el minuto 30 y 60 de remoción de *As*, indica que no se encuentra dentro de los límites máximos permisibles obteniendo un valor de 0.50 y 0.25 mg/L *As*, respectivamente. Sin embargo, en el minuto 90 de tratamiento, si se encuentra dentro del límite máximo permisible con un total de 0.09 mg/L.

---

## XI. RECOMENDACIONES

- Analizar la conductividad del agua residual hidrometalúrgica como un parámetro importante para disminuir el voltaje de la corriente de trabajo y a su vez, buscar la sostenibilidad energética.
- Mejorar el proceso de remoción de arsénico en aguas residuales hidrometalúrgicos mediante la evaluación de variables operativas como la distancia de electrodos, densidad de corriente y área electrodo.
- Optimizar la duración del proceso del tiempo de electrólisis para maximizar la remoción de *As* en función a las variables críticas de operación.
- Experimentar con diferentes tipos de polímeros como poliacrilamida (PAM) que actúa sobre pH ligeramente básicos para mejorar la formación de hidróxidos metálicos y flóculos y aumentar la remoción de *As*.
- Impulsar la investigación académica para innovar en el tratamiento de aguas residuales industriales, especialmente en la remoción de *As*, mediante el desarrollo de tecnologías de electrocoagulación y alternativas más eficientes y sostenibles.

---

## XII. REFERENCIAS

- [1] C. Mestanza-Ramón, R. Ordoñez-Alcivar, C. Arguello-Guadalupe, K. Carrera-Silva, G. D’Orio, y S. Straface, «History, Socioeconomic Problems and Environmental Impacts of Gold Mining in the Andean Region of Ecuador», *Int. J. Environ. Res. Public. Health*, vol. 19, n.º 3, p. 1190, ene. 2022, doi: 10.3390/ijerph19031190.
- [2] R. Adler Miserendino *et al.*, «Challenges to measuring, monitoring, and addressing the cumulative impacts of artisanal and small-scale gold mining in Ecuador», *Resour. Policy*, vol. 38, n.º 4, pp. 713-722, dic. 2013, doi: 10.1016/j.resourpol.2013.03.007.
- [3] L. Liu, W. Tan, S. L. Suib, G. Qiu, L. Zheng, y S. Su, «Enhanced adsorption removal of arsenic from mining wastewater using birnessite under electrochemical redox reactions», *Chem. Eng. J.*, vol. 375, p. 122051, nov. 2019, doi: 10.1016/j.cej.2019.122051.
- [4] L. Liu *et al.*, «Arsenic detoxification by iron-manganese nodules under electrochemically controlled redox: Mechanism and application», *J. Hazard. Mater.*, vol. 403, p. 123912, feb. 2021, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.123912.
- [5] H. Oza, T. S. Anantha Singh, y S. Sasikumar Jampa, «Removal of arsenic from aqueous solution using combined ultrasonic and electrocoagulation process», *Mater. Today Proc.*, vol. 47, pp. 728-732, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.01.569.
- [6] S. Mahimairaja, N. S. Bolan, D. C. Adriano, y B. Robinson, «Arsenic Contamination and its Risk Management in Complex Environmental Settings», en *Advances in Agronomy*, vol. 86, Elsevier, 2005, pp. 1-82. doi: 10.1016/S0065-2113(05)86001-8.
- [7] M. Ozturk *et al.*, «Arsenic and Human Health: Genotoxicity, Epigenomic Effects, and Cancer Signaling», *Biol. Trace Elem. Res.*, vol. 200, n.º 3, pp. 988-1001, mar. 2022, doi: 10.1007/s12011-021-02719-w.
- [8] M. A. Sandoval, R. Fuentes, A. Thiam, y R. Salazar, «Arsenic and fluoride removal by electrocoagulation process: A general review», *Sci. Total Environ.*, vol. 753, p. 142108, ene. 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142108.
- [9] A. Y. Gören, M. S. Öncel, E. Demirbas, E. Şık, y M. Kobya, «Removal of arsenate by electrocoagulation reactor using aluminum ball anode electrodes», *Water Pract. Technol.*, vol. 13, n.º 4, pp. 753-763, dic. 2018, doi: 10.2166/wpt.2018.088.
- [10] E. Şık, E. Demirbas, A. Y. Goren, M. S. Oncel, y M. Kobya, «Arsenite and arsenate removals from groundwater by electrocoagulation using iron ball anodes: Influence of

---

operating parameters», *J. Water Process Eng.*, vol. 18, pp. 83-91, ago. 2017, doi: 10.1016/j.jwpe.2017.06.004.

[11] A. Aguilar-Pesantes, E. Peña Carpio, T. Vitvar, R. Koepke, y J. M. Menéndez-Aguado, «A Comparative Study of Mining Control in Latin America», *Mining*, vol. 1, n.º 1, pp. 6-18, feb. 2021, doi: 10.3390/mining1010002.

[12] «GeoHealth - 2021 - Schwartz - A Review of the Scope of Artisanal and Small-Scale Mining Worldwide Poverty and the.pdf».

[13] R. Estupiñán, «La minería en Ecuador. Pasado, presente y futuro», *Bol. GEOLÓGICO Min.*, pp. 533-549, dic. 2021, doi: 10.21701/bolgeomin.132.4.010.

[14] C. F. Ihle y W. Kracht, «The relevance of water recirculation in large scale mineral processing plants with a remote water supply», *J. Clean. Prod.*, vol. 177, pp. 34-51, mar. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.12.219.

[15] C. Mestanza-Ramón *et al.*, «Gold Mining in the Amazon Region of Ecuador: History and a Review of Its Socio-Environmental Impacts», *Land*, vol. 11, n.º 2, p. 221, feb. 2022, doi: 10.3390/land11020221.

[16] C. Mestanza-Ramón *et al.*, «Artisanal and Small-Scale Gold Mining (ASGM): Management and Socioenvironmental Impacts in the Northern Amazon of Ecuador», *Sustainability*, vol. 14, n.º 11, p. 6854, jun. 2022, doi: 10.3390/su14116854.

[17] K. Escobar-Segovia *et al.*, «Heavy Metals in Rivers Affected by Mining Activities in Ecuador: Pollution and Human Health Implications», presentado en SUSTAINABLE WATER RESOURCES MANAGEMENT 2021, jul. 2021, pp. 61-72. doi: 10.2495/WRM210061.

[18] N. H. Tarras-Wahlberg, A. Flachier, S. N. Lane, y O. Sangfors, «Environmental impacts and metal exposure of aquatic ecosystems in rivers contaminated by small scale gold mining: the Puyango River basin, southern Ecuador», *Sci. Total Environ.*, vol. 278, n.º 1-3, pp. 239-261, oct. 2001, doi: 10.1016/S0048-9697(01)00655-6.

[19] P. C. Velásquez-López, M. M. Veiga, y K. Hall, «Mercury balance in amalgamation in artisanal and small-scale gold mining: identifying strategies for reducing environmental pollution in Portovelo-Zaruma, Ecuador», *J. Clean. Prod.*, vol. 18, n.º 3, pp. 226-232, feb. 2010, doi: 10.1016/j.jclepro.2009.10.010.

- 
- [20] K. Villamar Marazita *et al.*, «Heavy Metal Pollution Assessment in surface and groundwater in the Ponce Enríquez mining area, Ecuador.», en *Proceedings of the 21th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology (LACCEI 2023): “Leadership in Education and Innovation in Engineering in the Framework of Global Transformations: Integration and Alliances for Integral Development”*, Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions, 2023. doi: 10.18687/LACCEI2023.1.1.493.
- [21] P. Campoverde-Muñoz *et al.*, «Risk Assessment of Groundwater Contamination in the Gala, Tenguel, and Siete River Basins, Ponce Enriquez Mining Area—Ecuador», *Sustainability*, vol. 15, n.º 1, p. 403, dic. 2022, doi: 10.3390/su15010403.
- [22] B. Salgado-Almeida, D. A. Falquez-Torres, P. L. Romero-Crespo, P. E. Valverde-Armas, F. Guzmán-Martínez, y S. Jiménez-Oyola, «Risk Assessment of Mining Environmental Liabilities for Their Categorization and Prioritization in Gold-Mining Areas of Ecuador», *Sustainability*, vol. 14, n.º 10, p. 6089, may 2022, doi: 10.3390/su14106089.
- [23] A. Aguilar Pesantes, E. Peña Carpio, T. Vitvar, M. María Mahamud López, y J. Menéndez-Aguado, «A Multi-Index Analysis Approach to Heavy Metal Pollution Assessment in River Sediments in the Ponce Enríquez Area, Ecuador», *Water*, vol. 11, n.º 3, p. 590, mar. 2019, doi: 10.3390/w11030590.
- [24] S. Jiménez-Oyola *et al.*, «Ecological and probabilistic human health risk assessment of heavy metal(loid)s in river sediments affected by mining activities in Ecuador», *Environ. Geochem. Health*, vol. 43, n.º 11, pp. 4459-4474, nov. 2021, doi: 10.1007/s10653-021-00935-w.
- [25] D. Bolonio, M. J. García, I. García-Garizabal, S. Jiménez, M. Ortega, y W. Pincay, «Análisis espacial del riesgo para la salud por exposición a metales pesados en el campo minero Ponce Enríquez, Ecuador», en *Proceedings of the 17th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: “Industry, Innovation, and Infrastructure for Sustainable Cities and Communities”*, Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions, 2019. doi: 10.18687/LACCEI2019.1.1.117.
- [26] Á. Quishpe, P. Barreto, y A. Guevara, «REMOCIÓN DE ARSÉNICO DE EFLUENTES LÍQUIDOS DE PLANTAS DE BENEFICIO DE ORO Y CUERPOS HÍDRICOS, DE LA ZONA MINERA DE PONCE ENRÍQUEZ, POR RIZOFILTRACIÓN

---

CON PASTO AZUL (DACTYLIS GLOMERATA)», dic. 2021, doi: 10.5281/ZENODO.7402020.

[27] P. Romero-Crespo *et al.*, «Trace elements in farmland soils and crops, and probabilistic health risk assessment in areas influenced by mining activity in Ecuador», *Environ. Geochem. Health*, vol. 45, n.º 7, pp. 4549-4563, jul. 2023, doi: 10.1007/s10653-023-01514-x.

[28] M. I. Litter *et al.*, «Arsenic in Argentina: Occurrence, human health, legislation and determination», *Sci. Total Environ.*, vol. 676, pp. 756-766, ago. 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.04.262.

[29] S. U. Khan, I. H. Farooqi, M. Usman, y F. Basheer, «Energy Efficient Rapid Removal of Arsenic in an Electrocoagulation Reactor with Hybrid Fe/Al Electrodes: Process Optimization Using CCD and Kinetic Modeling», *Water*, vol. 12, n.º 10, p. 2876, oct. 2020, doi: 10.3390/w12102876.

[30] G. Jing, S. Ren, Y. Gao, W. Sun, y Z. Gao, «Electrocoagulation: A Promising Method to Treat and Reuse Mineral Processing Wastewater with High COD», *Water*, vol. 12, n.º 2, p. 595, feb. 2020, doi: 10.3390/w12020595.

[31] L. T. Núñez, «Acuerdo Ministerial 37 Registro Oficial Suplemento 213 de 27-mar.-2014 Ultima modificación: 12-jul.-2016 Estado: Reformado».

[32] H. K. Hansen, P. Nuñez, D. Raboy, I. Schippacasse, y R. Grandon, «Electrocoagulation in wastewater containing arsenic: Comparing different process designs», *Electrochimica Acta*, vol. 52, n.º 10, pp. 3464-3470, feb. 2007, doi: 10.1016/j.electacta.2006.01.090.

[33] J. Siqueira-Gay, L. J. Sonter, y L. E. Sánchez, «Exploring potential impacts of mining on forest loss and fragmentation within a biodiverse region of Brazil's northeastern Amazon», *Resour. Policy*, vol. 67, p. 101662, ago. 2020, doi: 10.1016/j.resourpol.2020.101662.

[34] C. B. Tabelin *et al.*, «Solid-phase partitioning and release-retention mechanisms of copper, lead, zinc and arsenic in soils impacted by artisanal and small-scale gold mining (ASGM) activities», *Chemosphere*, vol. 260, p. 127574, dic. 2020, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.127574.

- 
- [35] P. T. Mabey, W. Li, A. J. Sundufu, y A. H. Lashari, «Environmental Impacts: Local Perspectives of Selected Mining Edge Communities in Sierra Leone», *Sustainability*, vol. 12, n.º 14, p. 5525, jul. 2020, doi: 10.3390/su12145525.
- [36] M. Wilding *et al.*, «Exploring the Structure of High Temperature, Iron-bearing Liquids», *Mater. Today Proc.*, vol. 2, pp. S358-S363, 2015, doi: 10.1016/j.matpr.2015.05.050.
- [37] A. G. Stewart, «Mining is bad for health: a voyage of discovery», *Environ. Geochem. Health*, vol. 42, n.º 4, pp. 1153-1165, abr. 2020, doi: 10.1007/s10653-019-00367-7.
- [38] F. Habashi, «A short history of hydrometallurgy», *Hydrometallurgy*, vol. 79, n.º 1-2, pp. 15-22, sep. 2005, doi: 10.1016/j.hydromet.2004.01.008.
- [39] E. Peters, «Hydrometallurgical process innovation», *Hydrometallurgy*, vol. 29, n.º 1-3, pp. 431-459, jun. 1992, doi: 10.1016/0304-386X(92)90026-V.
- [40] M. Sadegh Safarzadeh, M. S. Bafghi, D. Moradkhani, y M. Ojaghi Ilkhchi, «A review on hydrometallurgical extraction and recovery of cadmium from various resources», *Miner. Eng.*, vol. 20, n.º 3, pp. 211-220, mar. 2007, doi: 10.1016/j.mineng.2006.07.001.
- [41] A. S. Yamashita, A. Thivierge, y T. A. M. Euzébio, «A review of modeling and control strategies for cone crushers in the mineral processing and quarrying industries», *Miner. Eng.*, vol. 170, p. 107036, ago. 2021, doi: 10.1016/j.mineng.2021.107036.
- [42] A. J. Whitworth, E. Forbes, I. Verster, V. Jokovic, B. Awatey, y A. Parbhakar-Fox, «Review on advances in mineral processing technologies suitable for critical metal recovery from mining and processing wastes», *Clean. Eng. Technol.*, vol. 7, p. 100451, abr. 2022, doi: 10.1016/j.clet.2022.100451.
- [43] B. Marmiroli, L. Rigamonti, y P. R. Brito-Parada, «Life Cycle Assessment in mineral processing – a review of the role of flotation», *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 27, n.º 1, pp. 62-81, ene. 2022, doi: 10.1007/s11367-021-02005-w.
- [44] M. M. Veiga y A. J. Gunson, «Gravity Concentration in Artisanal Gold Mining», *Minerals*, vol. 10, n.º 11, p. 1026, nov. 2020, doi: 10.3390/min10111026.
- [45] N. Garcia-Troncoso, H. Baykara, M. H. Cornejo, A. Riofrio, M. Tinoco-Hidalgo, y J. Flores-Rada, «Comparative mechanical properties of conventional concrete mixture and concrete incorporating mining tailings sands», *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 16, p. e01031, jun. 2022, doi: 10.1016/j.cscm.2022.e01031.

- 
- [46] J. Park, Y.-S. Han, y S.-W. Ji, «Investigation of Mineral-Processing Wastewater Recycling Processes: A Pilot Study», *Sustainability*, vol. 10, n.º 9, p. 3069, ago. 2018, doi: 10.3390/su10093069.
- [47] S. Meng, S. Wen, G. Han, X. Wang, y Q. Feng, «Wastewater Treatment in Mineral Processing of Non-Ferrous Metal Resources: A Review», *Water*, vol. 14, n.º 5, p. 726, feb. 2022, doi: 10.3390/w14050726.
- [48] Y.-S. Hong, K.-H. Song, y J.-Y. Chung, «Health Effects of Chronic Arsenic Exposure», *J. Prev. Med. Pub. Health*, vol. 47, n.º 5, pp. 245-252, sep. 2014, doi: 10.3961/jpmph.14.035.
- [49] I. Palma-Lara *et al.*, «Arsenic exposure: A public health problem leading to several cancers», *Regul. Toxicol. Pharmacol.*, vol. 110, p. 104539, feb. 2020, doi: 10.1016/j.yrtph.2019.104539.
- [50] J. Bundschuh *et al.*, «Seven potential sources of arsenic pollution in Latin America and their environmental and health impacts», *Sci. Total Environ.*, vol. 780, p. 146274, ago. 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146274.
- [51] E. Lacasa, S. Cotillas, C. Saez, J. Lobato, P. Cañizares, y M. A. Rodrigo, «Environmental applications of electrochemical technology. What is needed to enable full-scale applications?», *Curr. Opin. Electrochem.*, vol. 16, pp. 149-156, ago. 2019, doi: 10.1016/j.coelec.2019.07.002.
- [52] J. Xu *et al.*, «Remediation of heavy metal contaminated soil by asymmetrical alternating current electrochemistry», *Nat. Commun.*, vol. 10, n.º 1, p. 2440, jun. 2019, doi: 10.1038/s41467-019-10472-x.
- [53] P. Nuñez, H. K. Hansen, S. Aguirre, y C. Maureira, «Electrocoagulation of arsenic using iron nanoparticles to treat copper mineral processing wastewater», *Sep. Purif. Technol.*, vol. 79, n.º 2, pp. 285-290, jun. 2011, doi: 10.1016/j.seppur.2011.02.028.
- [54] Z. Al-Qodah, M. Tawalbeh, M. Al-Shannag, Z. Al-Anber, y K. Bani-Melhem, «Combined electrocoagulation processes as a novel approach for enhanced pollutants removal: A state-of-the-art review», *Sci. Total Environ.*, vol. 744, p. 140806, nov. 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140806.
- [55] M. J. Nyangi, Y. Chebude, K. F. Kilulya, y A. Minu, «Effects of coexisting ions on simultaneous removal of fluoride and arsenic from water by hybrid Al-Fe

---

electrocoagulation», *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 19, n.º 7, pp. 6667-6680, jul. 2022, doi: 10.1007/s13762-021-03598-3.

[56] Y. G. Asfaha, A. K. Tekile, y F. Zewge, «Hybrid process of electrocoagulation and electrooxidation system for wastewater treatment: A review», *Clean. Eng. Technol.*, vol. 4, p. 100261, oct. 2021, doi: 10.1016/j.clet.2021.100261.

[57] C. An, G. Huang, Y. Yao, y S. Zhao, «Emerging usage of electrocoagulation technology for oil removal from wastewater: A review», *Sci. Total Environ.*, vol. 579, pp. 537-556, feb. 2017, doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.11.062.

[58] J. A. G. Gomes *et al.*, «Arsenic removal by electrocoagulation using combined Al-Fe electrode system and characterization of products», *J. Hazard. Mater.*, vol. 139, n.º 2, pp. 220-231, ene. 2007, doi: 10.1016/j.jhazmat.2005.11.108.

[59] A. G. Merma, B. F. Santos, A. S. C. Rego, R. R. Hacha, y M. L. Torem, «Treatment of oily wastewater from mining industry using electrocoagulation: Fundamentals and process optimization», *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 9, n.º 6, pp. 15164-15176, nov. 2020, doi: 10.1016/j.jmrt.2020.10.107.

[60] M. Koby, R. D. C. Soltani, P. I. Omwene, y A. Khataee, «A review on decontamination of arsenic-contained water by electrocoagulation: Reactor configurations and operating cost along with removal mechanisms», *Environ. Technol. Innov.*, vol. 17, p. 100519, feb. 2020, doi: 10.1016/j.eti.2019.100519.

[61] V. Gilhotra *et al.*, «Electrocoagulation technology for high strength arsenic wastewater: Process optimization and mechanistic study», *J. Clean. Prod.*, vol. 198, pp. 693-703, oct. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.07.023.

[62] P. V. Nidheesh y T. S. A. Singh, «Arsenic removal by electrocoagulation process: Recent trends and removal mechanism», *Chemosphere*, vol. 181, pp. 418-432, ago. 2017, doi: 10.1016/j.chemosphere.2017.04.082.

[63]

«9REVISIONDEVARIABLESDEDISEÑOYCONDICIONESDEOPERACIONEN LA.pdf».

[64] K. Patidar, A. Chouhan, y L. S. Thakur, «Removal of Heavy Metals from Water and Waste Water by Electrocoagulation Process –A Review», vol. 04, n.º 11, nov. 2017.

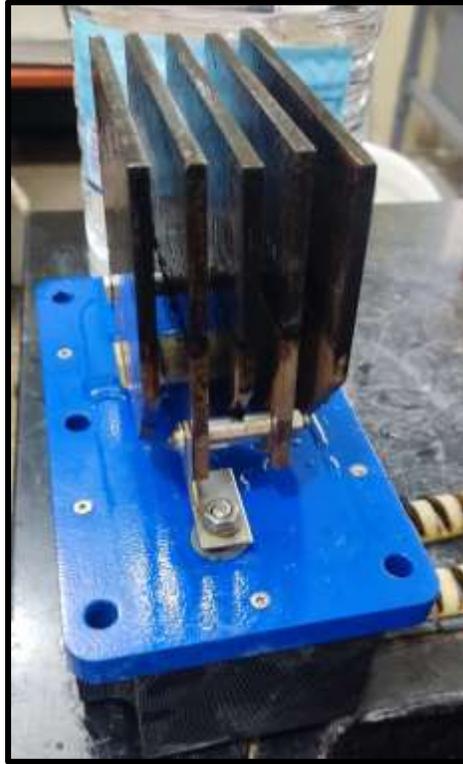
- [65] P. Ratna Kumar, S. Chaudhari, K. C. Khilar, y S. P. Mahajan, «Removal of arsenic from water by electrocoagulation», *Chemosphere*, vol. 55, n.º 9, pp. 1245-1252, jun. 2004, doi: 10.1016/j.chemosphere.2003.12.025.
- [66] «garciaespinosa.pdf.crdownload.pdf».
- [67] M. J. Nyangi, «Remediation of Arsenic from Water Using Iron and Aluminum Electrodes in Electrocoagulation Technology: Adsorption Isotherm and Kinetic Studies», *Chem. Afr.*, vol. 4, n.º 4, pp. 943-954, dic. 2021, doi: 10.1007/s42250-021-00268-2.
- [68] E. Mohora, S. Rončević, J. Agbaba, K. Zrnić, A. Tubić, y B. Dalmacija, «Arsenic removal from groundwater by horizontal-flow continuous electrocoagulation (EC) as a standalone process», *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 6, n.º 1, pp. 512-519, feb. 2018, doi: 10.1016/j.jece.2017.12.042.
- [69] F. Liu *et al.*, «Experimental study on treatment of tertiary oil recovery wastewater by electrocoagulation», *Chem. Eng. Process. - Process Intensif.*, vol. 144, p. 107640, oct. 2019, doi: 10.1016/j.cep.2019.107640.
- [70] «NECON - Sistema de tratamiento de aguas libre de químicos». [En línea]. Disponible en: [https://www.necon.de/fileadmin/Media/Kataloge/NECON\\_catalogo\\_ES.pdf](https://www.necon.de/fileadmin/Media/Kataloge/NECON_catalogo_ES.pdf)
- [71] V. F. Mena, A. Betancor-Abreu, S. González, S. Delgado, R. M. Souto, y J. J. Santana, «Fluoride removal from natural volcanic underground water by an electrocoagulation process: Parametric and cost evaluations», *J. Environ. Manage.*, vol. 246, pp. 472-483, sep. 2019, doi: 10.1016/j.jenvman.2019.05.147.
- [72] «Constitucion de la republica del Ecuador», Quito, Registro Oficial 449, oct. 2008. [En línea]. Disponible en: [https://www.defensa.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/02/Constitucion-de-la-Republica-del-Ecuador\\_act\\_ene-2021.pdf](https://www.defensa.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/02/Constitucion-de-la-Republica-del-Ecuador_act_ene-2021.pdf)
- [73] «LEY DE MINERÍA», Quito, Registro Oficial N° 517, ene. 2009.
- [74] «Acuerdo Ministerial N° 097-A Reformese Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente», Quito, Registro Oficial N° 387, nov. 2015. [En línea]. Disponible en: [https://www.gob.ec/sites/default/files/regulations/2018-09/Documento\\_Registro-Oficial-No-387-04-noviembre-2015\\_0.pdf](https://www.gob.ec/sites/default/files/regulations/2018-09/Documento_Registro-Oficial-No-387-04-noviembre-2015_0.pdf)
- [75] L. L. Bridgewater *et al.*, Eds., *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 23rd edition. Washington, DC: American Public Health Association, 2017.

---

[76] C. V. F. Vélez, «ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL CHIMBORAZO».

## ANEXOS

*Anexo A. Limpieza de las placas de hierro en el equipo T-NEC.*



*Anexo B. Proceso de remoción de arsénico en agua residual hidrometalúrgica mediante electrocoagulación.*



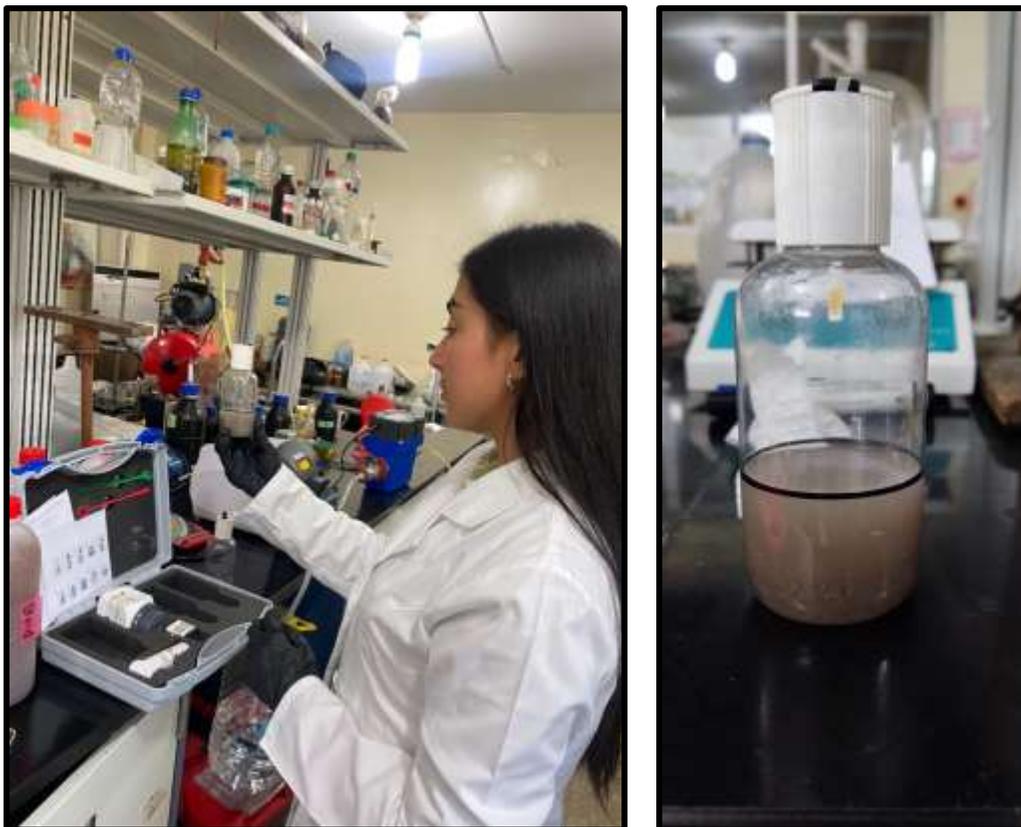
Anexo C. Recolección de la muestra de agua residual hidrometalúrgico del proceso de flotación.



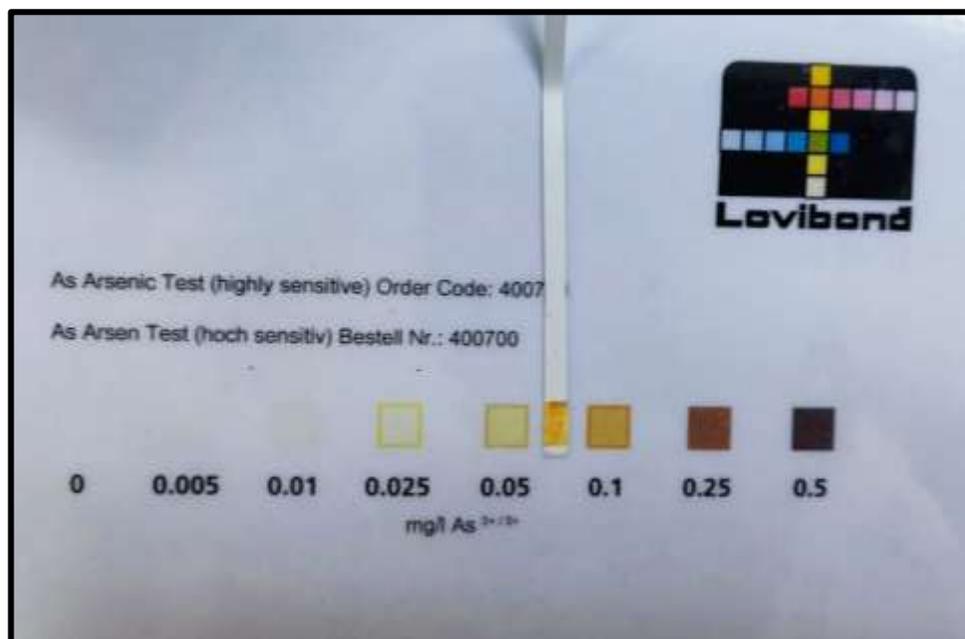
Anexo D. Medición de pH en agua sintética y agua residual hidrometalúrgica.



Anexo E. Test de arsénico con (Lovibond Water Testing) en agua sintética y agua residual.



Anexo F. Resultado de Test de arsénico (Lovibond Water Testing) en agua residual hidrometalúrgica en un pH de 8 a los 90 minutos de electrocoagulación.



Anexo G. Análisis de laboratorio del agua residual hidrometalúrgica.

DATOS DEL CLIENTE		DATOS DE LA MUESTRA	
Razón Social <sup>(*)</sup> :	TORRES JARAMILLO JULISSA FERNANDA	Descripción <sup>(*)</sup> :	Planta de Beneficio
Representante Legal <sup>(*)</sup> :	TORRES JARAMILLO JULISSA FERNANDA	Tipo de Muestra <sup>(*)</sup> :	Agua Residual
Dirección <sup>(*)</sup> :	CANTÓN CAMILO PONCE ENRIQUEZ, PROVINCIA DE EL AZUJAY	Punto de Muestreo <sup>(*)</sup> :	Tanques de Flotación
Teléfono <sup>(*)</sup> :	0978972049	Código de Muestra:	AG-01172024
Pers. Contacto <sup>(*)</sup> :	Sra. Torres Jaramillo Julissa Fernanda	Tipo de muestreo:	Simple
Orden de Trabajo:	OT-AG-0102-2024	Tomada por:	Cliente

FECHA DE EJECUCIÓN		CONDICIONES AMBIENTALES	
F.Recepción M./Hora:	22/5/2024 14:40	Tempe. de Recepción:	28,9 °C Equipo. AG-EQ-13
F.Toma muestra/Hora:	22/5/2024 14:40	Temperatura:	26,4 °C Equipo. AG-EQ-23
F.Ejecución de Ensayos:	22/5/2024 al 29/5/2024	Humedad Relativa:	46,7 %HR
F.Emisión del Informe:	29/5/2024	Coordenadas:	--- UTM WGS84

Metodología de Toma de Muestra:	N/A
Normativa de Calidad (LMP) <sup>(*)</sup> :	N/A

TABLA DE RESULTADOS						
Parámetros	Unidades	Resultados	Incertidumbre (K=2)	Límite Máximo Permisible	Método de Referencia	
2	Arsénico	mg/l	2,0508	---	---	PEE-GQM-FQ-33
1	Aluminio	mg/l	>0,50	---	---	PE-AG-42
1	Hierro	mg/l	>3,00	---	---	PE-AG-45

**NOTAS:**

- S.M. Corresponde al método de referencia Standard Methods.
- PE Corresponde al método Interno Procedimiento de Ensayo.
- Los resultados emitidos en este informe, corresponden únicamente a la(s) muestra(s) sometidas al ensayo.
- No se debe reproducir el Informe parcial o en su totalidad sin la aprobación escrita del Laboratorio.
- Sin marcación. Parámetro Incluido en el alcance de acreditación del laboratorio ante el SAE.
- 1 Parámetro no está Incluido en el alcance de acreditación del laboratorio ante el SAE.
- 2 Parámetro subcontratado CON acreditación, evaluación de competencia en base PG-AG-05, Capítulo 5.6  
- Resultado emitido por el Laboratorio con código de Acreditación SAE LEN 05-005
- 3 Parámetro subcontratado SIN acreditación, evaluación de competencia en base PG-AG-05, Capítulo 5.6
- 4 Parámetro acreditado Interno cuyo resultado esta fuera del alcance de acreditación del laboratorio ante el SAE.
- 5 Parámetro subcontratado CON acreditación cuyo resultado esta fuera del alcance de acreditación del laboratorio ante el SAE, evaluación de competencia en base PG-AG-05, Capítulo 5.6
- \* AGUIBULAB S.A., no se responsabiliza de la información que ha sido proporcionada por el cliente, y que pueda afectar directa o indirectamente a las validez de los resultados del presente informe.
- o La información designada para puntos de toma de muestra es proporcionada directamente por el cliente.
- La Incertidumbre expandida de medida se ha obtenido multiplicando la Incertidumbre estándar de medida por el factor de cobertura k=2 que, para una distribución normal, corresponde a una probabilidad de cobertura de aproximadamente el 95 %.

Anexo H. Resultados de remoción de arsénico en agua sintética a un pH de 4 en el laboratorio.

DATOS DEL CLIENTE		DATOS DE LA MUESTRA	
Razón Social <sup>(A)</sup> :	TORRES JARAMILLO JULISSA FERNANDA	Descripción <sup>(A)</sup> :	REMOCIÓN DE ARSÉNICO EN AGUA RESIDUAL
Representante Legal <sup>(A)</sup> :	TORRES JARAMILLO JULISSA FERNANDA	Tipo de Muestra <sup>(A)</sup> :	Agua Residual
Dirección <sup>(A)</sup> :	AV. PANAMERICA KM S 1/2 VIA PASAJE - MACHALA	Punto de Muestreo <sup>(B)</sup> :	Muestra C
Teléfono <sup>(A)</sup> :	0978972049	Código de Muestra:	AG-01512024
Pers. Contacto <sup>(A)</sup> :	TORRES JARAMILLO JULISSA FERNANDA	Tipo de muestreo:	Simple
Orden de Trabajo:	OT-AG-0113-2024	Tomada por:	Cliente

FECHA DE EJECUCIÓN		CONDICIONES AMBIENTALES	
F.Recepción M./Hora:	11/6/2024 4:00 p. m.	Tempe. de Recepción:	24,0 °C
F.Toma muestra/Hora:	11/6/2024 2:30 p. m.	Temperatura:	N/A
F.Ejecución de Ensayos:	11/6/2024 al 24/6/2024	Humedad Relativa:	N/A
F.Emisión del Informe:	25/6/2024	Coordenadas:	N/A

Metodología de Toma de Muestra:	N/A
Normativa de Calidad (LMP) <sup>(A)</sup> :	N/A

TABLA DE RESULTADOS					
Parámetros	Unidades	Resultados	Incertidumbre (K=2)	Limite Máximo Permissible	Método de Referencia
1 Arsénico	mg/l	0,1238	---	---	PEE-GQM-FQ-33

**NOTAS:**

- S.M. Corresponde al método de referencia Standard Methods.
- PE Corresponde al método Interno Procedimiento de Ensayo.
- Los resultados emitidos en este Informe, corresponden únicamente a la(s) muestra(s) sometidas al ensayo.
- No se debe reproducir el Informe parcial o en su totalidad sin la aprobación escrita del Laboratorio.
- Sin marcación. Parámetro Incluido en el alcance de acreditación del laboratorio ante el SAE.
- Parámetro no está Incluido en el alcance de acreditación del laboratorio ante el SAE.
- 1 Parámetro subcontratado CON acreditación, evaluación de competencia en base PG-AG-05, Capítulo 5.6
- Resultado emitido por el Laboratorio con código de Acreditación SAE LEN 05-001
- 2 Parámetro subcontratado SIN acreditación, evaluación de competencia en base PG-AG-05, Capítulo 5.6
- 4 Parámetro acreditado Interno cuyo resultado está fuera del alcance de acreditación del laboratorio ante el SAE.
- 5 Parámetro subcontratado CON acreditación cuyo resultado está fuera del alcance de acreditación del laboratorio ante el SAE, evaluación de competencia en base PG-AG-05, Capítulo 5.6
- 6 AGUIBULAB S.A., no se responsabiliza de la Información que ha sido proporcionada por el cliente, y que pueda afectar directa o indirectamente a las validez de los resultados del presente Informe.
- 8 La Información designada para puntos de toma de muestra es proporcionada directamente por el cliente.
- La Incertidumbre expandida de medida se ha obtenido multiplicando la Incertidumbre estándar de medida por el factor de cobertura k=2 que, para una distribución normal, corresponde a una probabilidad de cobertura de aproximadamente el 95 %.

Anexo I. Resultados de remoción de arsénico en agua sintética a un pH de 8 en el laboratorio.

DATOS DEL CLIENTE		DATOS DE LA MUESTRA	
Razón Social <sup>(A)</sup> :	TORRES JARAMILLO JULISSA FERNANDA	Descripción <sup>(A)</sup> :	REMOCIÓN DE ARSÉNICO EN AGUA RESIDUAL
Representante Legal <sup>(A)</sup> :	TORRES JARAMILLO JULISSA FERNANDA	Tipo de Muestra <sup>(A)</sup> :	Agua Residual
Dirección <sup>(A)</sup> :	AV. PANAMERICA KM 5 1/2 VIA PASAJE - MACHALA	Punto de Muestreo <sup>(A)</sup> :	Muestra A
Teléfono <sup>(A)</sup> :	0978972049	Código de Muestra:	AG-01492024
Pers. Contacto <sup>(A)</sup> :	TORRES JARAMILLO JULISSA FERNANDA	Tipo de muestreo:	Simple
Orden de Trabajo:	OT-AG-0113-2024	Tomada por:	Cliente

FECHA DE EJECUCIÓN		CONDICIONES AMBIENTALES	
F.Recepción M./Hora:	11/6/2024 4:00 p. m.	Tempe. de Recepción:	24,0 °C
F.Toma muestra/Hora:	11/6/2024 2:30 p. m.	Temperatura:	N/A
F.Ejecución de Ensayos:	11/6/2024 al 24/6/2024	Humedad Relativa:	N/A
F.Emisión del Informe:	25/6/2024	Coordenadas:	N/A

Metodología de Toma de Muestra:	N/A
Normativa de Calidad (LMP) <sup>(A)</sup> :	N/A

TABLA DE RESULTADOS					
Parámetros	Unidades	Resultados	Incertidumbre (K=2)	Limite Máximo Permissible	Método de Referencia
1 Arsénico	mg/l	0,0605	---	---	PEE-GQM-FQ-33

**NOTAS:**

- S.M. Corresponde al método de referencia Standard Methods.
- PE Corresponde al método Interno Procedimiento de Ensayo.
- Los resultados emitidos en este informe, corresponden únicamente a la(s) muestra(s) sometidas al ensayo.
- No se debe reproducir el Informe parcial o en su totalidad sin la aprobación escrita del Laboratorio.
- Sin marcación. Parámetro incluido en el alcance de acreditación del laboratorio ante el SAE.
- 1 Parámetro no está incluido en el alcance de acreditación del laboratorio ante el SAE.
- 2 Parámetro subcontratado CON acreditación, evaluación de competencia en base PG-AG-05, Capítulo 5.6
- Resultado emitido por el Laboratorio con código de Acreditación SAE LEIN 05-001
- 3 Parámetro subcontratado SIN acreditación, evaluación de competencia en base PG-AG-05, Capítulo 5.6
- 4 Parámetro acreditado interno cuyo resultado esta fuera del alcance de acreditación del laboratorio ante el SAE.
- 5 Parámetro subcontratado CON acreditación cuyo resultado esta fuera del alcance de acreditación del laboratorio ante el SAE, evaluación de competencia en base PG-AG-05, Capítulo 5.6
- 6 AGUIBULAB S.A., no se responsabiliza de la información que ha sido proporcionada por el cliente, y que pueda afectar directa o indirectamente a las validez de los resultados del presente informe.
- 7 La información designada para puntos de toma de muestra es proporcionada directamente por el cliente.
- 8 La incertidumbre expandida de medida se ha obtenido multiplicando la incertidumbre estándar de medida por el factor de cobertura k=2 que, para una distribución normal, corresponde a una probabilidad de cobertura de aproximadamente el 95 %.

Anexo J. Resultados de remoción de arsénico en agua sintética a un pH de 12 en el laboratorio.

DATOS DEL CLIENTE		DATOS DE LA MUESTRA	
Razón Social <sup>(*)</sup> :	TORRES JARAMILLO JULISSA FERNANDA	Descripción <sup>(*)</sup> :	REMOCIÓN DE ARSÉNICO EN AGUA RESIDUAL
Representante Legal <sup>(*)</sup> :	TORRES JARAMILLO JULISSA FERNANDA	Tipo de Muestra <sup>(*)</sup> :	Agua Residual
Dirección <sup>(*)</sup> :	AV. PANAMERICA KM 5 1/2 VIA PASAJE - MACHALA	Punto de Muestreo <sup>(*)</sup> :	Muestra B
Teléfono <sup>(*)</sup> :	0978972049	Código de Muestra:	AG-01502024
Pers. Contacto <sup>(*)</sup> :	TORRES JARAMILLO JULISSA FERNANDA	Tipo de muestreo:	Simple
Orden de Trabajo:	OT-AG-0113-2024	Tomada por:	Cliente

FECHA DE EJECUCIÓN		CONDICIONES AMBIENTALES	
F.Recepción M./Hora:	11/6/2024 4:00 p. m.	Tempe. de Recepción:	24,0 °C
F.Toma muestra/Hora:	11/6/2024 2:30 p. m.	Temperatura:	N/A
F.Ejecución de Ensayos:	11/6/2024 al 24/6/2024	Humedad Relativa:	N/A
F.Emisión del Informe:	25/6/2024	Coordenadas:	N/A

Metodología de Toma de Muestra:	N/A
Normativa de Calidad (LMP) <sup>(*)</sup> :	N/A

TABLA DE RESULTADOS					
Parámetros	Unidades	Resultados	Incertidumbre (K=2)	Limite Máximo Permisible	Método de Referencia
Ⓢ Arsénico	mg/l	0,2342	---	---	PEE-GQM-FQ-33

**NOTAS:**

- S.M. Corresponde al método de referencia Standard Methods.
- PE Corresponde al método interno Procedimiento de Ensayo.
- Los resultados emitidos en este informe, corresponden únicamente a la(s) muestra(s) sometidas al ensayo.
- No se debe reproducir el informe parcial o en su totalidad sin la aprobación escrita del Laboratorio.
- Sin marcación. Parámetro incluido en el alcance de acreditación del laboratorio ante el SAE.
- 1 Parámetro no está incluido en el alcance de acreditación del laboratorio ante el SAE.
- 2 Parámetro subcontratado CON acreditación, evaluación de competencia en base PG-AG-05, Capítulo 5.6
- 3 Parámetro subcontratado SIN acreditación, evaluación de competencia en base PG-AG-05, Capítulo 5.6
- 4 Parámetro acreditado interno cuyo resultado está fuera del alcance de acreditación del laboratorio ante el SAE.
- 5 Parámetro subcontratado CON acreditación cuyo resultado está fuera del alcance de acreditación del laboratorio ante el SAE, evaluación de competencia en base PG-AG-05, Capítulo 5.6
- Resultado emitido por el Laboratorio con código de Acreditación SAE LEN 05-001
- Ⓢ AGUIBULAB S.A., no se responsabiliza de la información que ha sido proporcionada por el cliente, y que pueda afectar directa o indirectamente a las validez de los resultados del presente informe.
- Ⓢ La información designada para puntos de toma de muestra es proporcionada directamente por el cliente.
- La incertidumbre expandida de medida se ha obtenido multiplicando la incertidumbre estándar de medida por el factor de cobertura k=2 que, para una distribución normal, corresponde a una probabilidad de cobertura de aproximadamente el 95 %.

Anexo K. Resultados de remoción de arsénico en agua residual hidrometalúrgica a un pH de 8 en el laboratorio.

DATOS DEL CLIENTE		DATOS DE LA MUESTRA	
Razón Social <sup>(a)</sup> :	TORRES JARAMILLO JULISSA FERNANDA	Descripción <sup>(a)</sup> :	REMOCIÓN DE ARSÉNICO EN AGUA RESIDUAL
Representante Legal <sup>(a)</sup> :	TORRES JARAMILLO JULISSA FERNANDA	Tipo de Muestra <sup>(a)</sup> :	Agua Residual
Dirección <sup>(a)</sup> :	AV. PANAMERICA KM 5 1/2 VIA PASAJE - MACHALA	Punto de Muestreo <sup>(b)</sup> :	Muestra D
Teléfono <sup>(a)</sup> :	0978972049	Código de Muestra:	AG-01522024
Pers. Contacto <sup>(a)</sup> :	TORRES JARAMILLO JULISSA FERNANDA	Tipo de muestreo:	Simple
Orden de Trabajo:	OT-AG-0113-2024	Tomada por:	Cliente

FECHA DE EJECUCIÓN		CONDICIONES AMBIENTALES	
F.Recepción M./Hora:	11/6/2024 4:00 p. m.	Tempe. de Recepción:	24,0 °C
F.Toma muestra/Hora:	11/6/2024 2:30 p. m.	Temperatura:	N/A
F.Ejecución de Ensayos:	11/6/2024 al 24/6/2024	Humedad Relativa:	N/A
F.Emisión del Informe:	25/6/2024	Coordenadas:	N/A

Metodología de Toma de Muestra:	N/A
Normativa de Calidad (LMP) <sup>(a)</sup> :	N/A

TABLA DE RESULTADOS					
Parámetros	Unidades	Resultados	Incertidumbre (K=2)	Limite Máximo Permisible	Método de Referencia
2 Arsénico	mg/l	0,0917	---	---	PEE-GQM-FQ-33

**NOTAS:**

- S.M. Corresponde al método de referencia Standard Methods.
- PE Corresponde al método interno Procedimiento de Ensayo.
- Los resultados emitidos en este informe, corresponden únicamente a la(s) muestra(s) sometidas al ensayo.
- No se debe reproducir el informe parcial o en su totalidad sin la aprobación escrita del Laboratorio.
- Sin marcación. Parámetro incluido en el alcance de acreditación del laboratorio ante el SAE.

- 1 Parámetro no está incluido en el alcance de acreditación del laboratorio ante el SAE.
- 2 Parámetro subcontratado CON acreditación, evaluación de competencia en base PG-AG-05, Capítulo 5.6
- Resultado emitido por el Laboratorio con código de Acreditación SAE LEN 05-001
- 3 Parámetro subcontratado SIN acreditación, evaluación de competencia en base PG-AG-05, Capítulo 5.6
- 4 Parámetro acreditado interno cuyo resultado esta fuera del alcance de acreditación del laboratorio ante el SAE.
- 5 Parámetro subcontratado CON acreditación cuyo resultado esta fuera del alcance de acreditación del laboratorio ante el SAE, evaluación de competencia en base PG-AG-05, Capítulo 5.6