



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO

**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN,
VINCULACIÓN Y POSGRADO**

DIRECCIÓN DE POSGRADO

TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE:

**MAGÍSTER EN INGENIERIA AMBIENTAL MENCIÓN RECURSOS
HIDRICOS**

TEMA:

**“EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UN SISTEMA DE CELDAS DE
COMBUSTIBLE MICROBIANAS DE DOBLE CÁMARA PARA LA
GENERACIÓN DE BIOELECTRICIDAD Y EL TRATAMIENTO
SIMULTÁNEO DE AGUA RESIDUAL MINERA Y SINTÉTICA”**

AUTOR:

Ing. Henry Darío Cando Carrillo

TUTOR:

Ing. María Rafaela Viteri Uzcátegui, Msc

Riobamba – Ecuador

2024

Certificación del Tutor

Certifico que el presente trabajo de titulación denominado: **“Evaluación del desempeño de un sistema de celdas de combustible microbianas de doble cámara para la generación de bioelectricidad y el tratamiento simultáneo de agua residual minera y sintética.”**, ha sido elaborado por el Ingeniero Henry Darío Cando Carrillo, el mismo que ha sido orientado y revisado con el asesoramiento permanente de mi persona en calidad de Tutor. Así mismo, refrendo que dicho trabajo de titulación ha sido revisado por la herramienta antiplagio institucional; por lo que certifico que se encuentra apto para su presentación y defensa respectiva.

Es todo cuanto puedo informar en honor a la verdad.

Riobamba, 4 de diciembre, de 2024

Ing. María Rafaela Viteri Uzcátegui, Mgs/PhD.

TUTOR

Declaración de Autoría y Cesión de Derechos

Yo, **Henry Darío Cando Carrillo**, con número único de identificación **060411623-6**, declaro y acepto ser responsable de las ideas, doctrinas, resultados y lineamientos alternativos realizados en el presente trabajo de titulación denominado: “Evaluación del desempeño de un sistema de celdas de combustible microbianas de doble cámara para la generación de bioelectricidad y el tratamiento simultaneo de agua residual minera y sintética.” previo a la obtención del grado de Magíster en Ingeniería Ambiental con mención en Recursos Hídricos.

Declaro que mi trabajo investigativo pertenece al patrimonio de la Universidad Nacional de Chimborazo de conformidad con lo establecido en el artículo 20 literal j) de la Ley Orgánica de Educación Superior LOES.

- Autorizo a la Universidad Nacional de Chimborazo que pueda hacer uso del referido trabajo de titulación y a difundirlo como estime conveniente por cualquier medio conocido, y para que sea integrado en formato digital al Sistema de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor, dando cumplimiento de esta manera a lo estipulado en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior LOES.

Riobamba 5, diciembre de 2024



Ing. Henry Darío Cando Carrillo

N.U.I. 060411623-6

Agradecimiento

A Dios por su amor y bondad. Gracias a mi madre y padre por ser un gran ejemplo de constancia y superación. A toda mi familia por haberme apoyado y guiado a lo largo de toda esta investigación, por brindarme su confianza y su motivación. A mi directora del Trabajo de Titulación la Ing. María Rafaela Viteri, por ser una excelente persona y brindarme su apoyo incondicional para la elaboración del presente trabajo, también un sincero agradecimiento al Doc. Celso Guillermo Recalde, por brindarme su ayuda para la mejora y elaboración de esta investigación.

Agradecer al Grupo de Energías Alternativas y Ambiente (GEAA) por su apoyo y confianza no solo me han permitido adquirir conocimientos, sino también desarrollar habilidades y valores que ahora forman parte esencial de mi carrera.

A mis amigos por apoyarme cuando más lo he necesitado por extenderme su mano en los momentos difíciles y de manera desinteresada. Gracias a todos y quienes de una u otra manera me han brindado su apoyo y motivación para desarrollar mi investigación y lograr cumplir con este objetivo tan anhelado.

Dedicatoria

A Dios por bendecirme en cada día de mi vida y por permitirme llegar a este momento tan especial. A mi madre y padre, María Carrillo, Cesar Cando por su amor y apoyo incondicional en cada momento, gracias por ser los mejores guías y por inculcar en mí el ejemplo del esfuerzo y el sacrificio. A mis hermanas y hermanos por compartir conmigo buenos momentos. A mi familia en general por confiar y creer en mis capacidades y sobre todo por el gran apoyo que me han brindado durante todo el tiempo de mi travesía académica.

Para todos ustedes con amor y cariño

Henry Darío Cando Carrillo

Índice General

Certificación del Tutor	ii
Declaración de Autoría y Cesión de Derechos	iii
Agradecimiento	iv
Dedicatoria	v
Índice General.....	vi
Índice de Tablas	ix
Índice de Figuras	x
Resumen	
Abstract	
Introducción	3
Capítulo 1 Generalidades.....	5
1.1 Planteamiento del problema	5
1.2 Justificación de la Investigación.....	6
1.3 Objetivos.....	7
1.3.1 Objetivo General	7
1.3.2 Objetivos Específicos.....	7
Capítulo 2 Estado del Arte y la Práctica	8
2.1 Antecedentes Investigativos	8
2.2 Fundamentación Legal	10
2.3 Fundamentación Teórica	11
2.3.1 Sistemas bioelectroquímicos (BES).....	11
2.3.2 Celdas de Combustible Microbianas (CCM)	11
2.3.3 Celdas de Combustible Microbianas de Doble Cámara.....	12
2.3.4 Clasificación.....	13
2.3.5 Componentes de una celda de Combustible Microbianas.....	14

2.3.6	Microorganismos.....	16
2.3.7	Bioenergía	18
2.3.8	Aguas residuales.....	18
2.3.9	Agua residual minera	18
2.3.10	Tratamientos del agua residual minera.....	19
2.3.11	Biorremediación	19
Capítulo 3. Diseño Metodológico.....		21
3.1	Enfoque de la Investigación	21
3.2	Diseño de la Investigación.....	21
3.3	Tipo de investigación.....	21
3.3.1	Por su alcance.....	21
3.3.2	Por su diseño	22
3.4	Área de estudio	22
3.5	Técnicas e Instrumentos de muestreo y recolección de datos	22
3.6	Análisis fisicoquímicos del agua residual	23
3.7	Preparación del medio de cultivo para el crecimiento de microalgas	26
3.8	Formación de biofilm en el cátodo	27
3.9	Pretratamiento del ánodo y cátodo	27
3.10	Diseño y Construcción de las CCM de doble cámara.....	28
3.11	Evaluación de CCM de doble cámara.....	29
3.12	Población y Muestra	31
3.12.1	Población	31
3.12.2	Tamaño de la Muestra	31
Capítulo 4 Análisis y Discusión de los Resultados		32
4.1	Análisis Descriptivo de los Resultados	32
4.1.1	Características fisicoquímicas del agua residual minera y sintética	32

4.1.2	Potencial de generación de bioelectricidad del sistema de CCM de doble cámara	34
4.1.3	Medidas electroquímicas	35
4.1.4	Eficiencia del sistema de CCM para el tratamiento simultaneo del agua residual minera y sintética.	37
4.2	Discusión de los Resultados	40
Capítulo 5 Conclusiones		43
Recomendaciones.....		44
Referencias Bibliográficas		45

Índice de Tablas

Tabla 1.-Parámetros químicos realizados en el laboratorio.....	24
Tabla 2: Caracterización fisicoquímica del agua residual minera.	32
Tabla 3: Caracterización fisicoquímica del agua sintética	33

Índice de Figuras

Figura 1. Celda de Combustible Microbiana.....	12
Figura 2. Celda de Combustible Microbiana de doble Camara.....	14
Figura 3. Planta de procesamiento Bemimport, Zaruma-Portovelo	23
Figura 4. Preparación del medio de cultivo (BG11).....	26
Figura 5. Cátodo sumergido en cultivo puro de microalga	27
Figura 6. Anodo sumergido en solución de peroxidisulfato de amonio y ácido sulfúrico	28
Figura 7: Configuración de CCM de doble cámara.....	28
Figura 8. Tarjeta de adquisición de datos	30
Figura 9. Voltaje generado por las CCM de doble cámara.	34
Figura 10. Curva de polarización CCM5.....	35
Figura 11. Curva de polarización CCM6.....	36
Figura 12. Curva de polarización CCM7.....	36
Figura 13. Curva de polarización CCM8.....	37
Figura 14. Porcentaje de remoción de metales	37
Figura 15. Porcentaje de remoción de contaminantes	38
Figura 16. Porcentaje de remoción de contaminantes del agua sintética	39

Resumen

El objetivo del presente trabajo fue evaluar el desempeño de un sistema de celdas de combustible microbianas de doble cámara para el tratamiento y generación de bioelectricidad a partir de agua residual minera y sintética. Para lo cual se realizó un muestreo del agua residual minera recolectada del proceso de cianuración de la Planta Bemimport, ubicada en el Distrito Minero de Zaruma-Portovelo. Se construyeron cuatro celdas de combustible microbianas de doble cámara (CCM) donde CCM6, CCM7, CCM8 tenían *Microactinium inermum* como biocatalizador y la CCM5 sin biocatalizador cada una con 450ml de agua residual y 50 gr de relaves mineros. Se utilizó celofán como membrana intercambiadora de protones para separar la cámara anaerobia de la aerobia, para los electrodos ánodo y cátodo se utilizó fibra de carbono. El voltaje se registró en una tarjeta de adquisición de datos durante 21 días. Los resultados muestran que las CCM de doble cámara alcanzaron voltajes máximos de 0.215 V, 0.188 V y 0.167 V superando así el desempeño de la celda control. En términos de remoción de metales pesados, las CCM lograron una eliminación del 99.99% para Hg y un 100% para Pb. Además, mostraron una alta eficiencia en la remoción de materia orgánica y compuestos nitrogenados, alcanzando valores superiores al 99% para la DQO y la DBO, así como un 63.18% de remoción de Nitritos (NO_2^-) y un 86% de Nitratos (NO_3^-). Las CCM demostró ser eficaz y viable para el tratamiento de aguas residuales mineras y la generación de bioelectricidad.

Palabras claves: *Bioelectricidad, Celdas de Combustible Microbiano, Microalga, Ánodo, Cátodo*

Abstract

The objective of this research was to evaluate the performance of a dual-chamber microbial fuel cell system for the treatment and generation of bioelectricity from mining and synthetic wastewater. A sample of the mining wastewater collected from the cyanidation process at the Bemimport Plant, situated within the Zaruma-Portovelo Mining District, was obtained for the purpose of analysis. Four double chamber microbial fuel cells (MFCs) were constructed where MFC6, MFC7, and MFC8 had *Microactinium inermum* as biocatalyst and MFC5 without biocatalyst each with 450ml of wastewater and 50 grams of mine tailings. Cellophane was used as a proton exchange membrane to separate the anaerobic chamber from the aerobic chamber, and carbon fibre was used for the anode and cathode electrodes. The voltage was recorded on a data acquisition card for 21 days. The results show that the dual chamber MCCs achieved maximum voltages of 0.215 V, 0.188 V and 0.167 V, thus outperforming the control cell. The results show that the dual chamber MCCs achieved maximum voltages of 0.215 V, 0.188 V and 0.167 V, outperforming the control cell. In terms of heavy metal removal, the MCCs achieved 99.99% removal for Hg and 100% removal for Pb. In addition, they showed high efficiencies in the removal of organic matter and nitrogen compounds, reaching values above 99% for COD and BOD, as well as 63.18% removal of nitrites (NO₂⁻) and 86% removal of nitrates (NO₃⁻). The MCC proved to be effective and viable for the treatment of mining wastewater and the generation of bioelectricity.

Keywords: Bioelectricity, Microbial Fuel Cell, *Microalgae*, Anode, Cathode.

Reviewed by
Lic. Jaime Ramiro Silva Verdezoto. MTEFL
ENGLISH PROFESSOR
C.I 0603736299

Introducción

El aumento demográfico acelerado ha provocado un incremento significativo en la contaminación de los cuerpos hídricos. Este impacto se ve intensificado por los vertidos incontrolados de efluentes industriales que, en muchos casos, no cuentan con sistemas adecuados para la remoción eficiente de contaminantes. Esta situación es especialmente preocupante en el sector minero, donde el uso intensivo de reactivos químicos en los procesos de extracción genera aguas residuales altamente contaminadas con metales pesados, que presenta una amenaza para el medio ambiente. Frente a esta realidad, se requiere el desarrollo de tecnologías innovadoras y sostenibles para el tratamiento de efluentes que minimicen el impacto ambiental provocado por la actividad industrial.

Una tecnología para el tratamiento del agua residual son las celdas de combustible microbiano (CCM) de doble cámara, que han surgido como una tecnología innovadora y prometedora, tanto para la generación de bioelectricidad, como para la remoción de contaminantes. Sin embargo, existen escasos estudios sobre el uso de aguas residuales mineras en las CCM, ya que contienen altos niveles de metales pesados tóxicos para el ser humano, pero que pueden ser aprovechados por los microorganismos electrogénicos, para convertir la energía química presente en el agua residual en energía eléctrica. Una característica importante de las CCM es su capacidad para operar de manera eficiente a temperatura ambiente, de esta manera esta tecnología ofrece un doble beneficio, el aprovechamiento energético de los residuos en el agua y la reducción de la carga contaminante.

El presente estudio tiene como objetivo principal evaluar el desempeño de un sistema CCM de doble cámara para tratar y generar bioelectricidad a partir de aguas residuales mineras y sintéticas. Se emplearon cuatro CCM de vidrio con 450 mL de agua residual y 50 gr de sedimentos mineros. Se utilizó celofán como membrana de intercambio protónico

(MIP) la cual separa la cámara anódica de la catódica, para el ánodo y cátodo se utilizó fibra de carbono sometidos a tratamiento para eliminar impurezas y favorecer a la formación de biofilm de *Microactinium inermum*, posteriormente se ensamblaron las CCM en el laboratorio y se realizaron los análisis físico-químicos del agua residual.

Con base en lo anterior, el presente estudio buscó proporcionar una evaluación de la capacidad de las CCM de doble cámara para eliminar, contaminantes específicos que se encuentran presentes en aguas residuales mineras y sintéticas, como Nitritos (NO_2^-), Nitratos (NO_3^-), fosfatos (PO_4^{3-}), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5), Demanda Química de Oxígeno, Mercurio (Hg) y Plomo (Pb). Asimismo, se analizó la producción de bioelectricidad, el grado de remoción de contaminantes y su eficiencia. La investigación desarrollo una alternativa biológica para el tratamiento de efluentes generados por la industria minera, utilizando tecnología de CCM, se espera que esta tecnología pueda aplicarse a escala en el campo de manera sostenible, mitigando así los impactos negativos de la contaminación sobre los recursos hídrico.

Capítulo 1

Generalidades

1.1 Planteamiento del problema

La minería artesanal de oro en el Ecuador se concentra en el sur del país, en las provincias de Zamora, Azuay y El Oro, presentando una grave amenaza para el ambiente, dado que durante el proceso de extracción, debido al uso de elementos altamente tóxicos, se liberan metales pesados, tales como Hg, Pb, As y Cd, los cuales generan un riesgo para la salud humana y la biodiversidad (Osorio et al., 2020). Esta problemática es particularmente preocupante, ya que gran parte de los efluentes mineros contienen iones tóxicos, que no reciben un tratamiento adecuado y son vertidos directamente en ríos, lagos y otras fuentes de agua, generando graves impactos en el recurso hídrico, el ambiente y la salud de las poblaciones aledañas (García et al., 2019).

Debido al incremento de los efluentes mineros surge la necesidad de encontrar soluciones sostenibles para la remoción de contaminantes. Una tecnología emergente son las CCM que permite el tratamiento del agua residual y la producción de bioelectricidad, sin embargo, los estudios sobre CCM en particular, la configuración de doble cámara es limitada, porque la mayoría de las investigaciones se han centrado en sistemas de cámara simple por razones de simplicidad, costos y una transferencia de electrones más eficiente. Otro de los problemas asociados a las CCM, radica en la utilización de consorcios bacterianos, con escasa investigación en la exploración de microalgas para mejorar la producción de voltajes y la remediación. No obstante, su implementación en el tratamiento de aguas residuales mineras requiere una investigación exhaustiva que determine su eficiencia y viabilidad (H. Zhang et al., 2022).

Por lo tanto, el presente estudio plantea la necesidad de evaluar la efectividad de las CCM de doble cámara con microalgas *M. inermum*, en la remoción de contaminantes y la generación de bioelectricidad. Esta investigación busca ofrecer una solución innovadora que permita mejorar la calidad de los cuerpos hídricos afectados y reducir el impacto ambiental de la actividad minera, contribuyendo así a la protección de los recursos naturales y al bienestar de las comunidades (Christopher et al., 2020).

1.2 Justificación de la Investigación

A nivel global, la minería representa una significativa fuente de ingresos en regiones donde las opciones económicas son escasas. En Ecuador, la actividad minera se concentra en el sur del país, en las provincias de Zamora, Azuay y El Oro, donde se localizan las instalaciones de procesamiento de mineral (Mestanza-Ramón et al., 2022). Aunque la minería se considera una actividad estratégica en el marco de la matriz productiva, su práctica inadecuada tiene consecuencias negativas para el ambiente y las condiciones socioeconómicas locales, debido a los métodos inapropiados de extracción y disposición de subproductos tóxicos como iones metálicos generados durante el procesamiento del mineral (Xiao et al., 2022).

De esta manera, surge la necesidad de investigar un método más sostenible para el tratamiento de efluentes mineros, las CCM de doble cámara emergen como una tecnología innovadora, ya que además de facilitar la remoción de contaminantes orgánicos e inorgánicos, permiten la generación de bioelectricidad como subproducto (Qi et al., 2022). Esta capacidad de las CCM no solo presenta una ventaja ambiental al reducir la carga contaminante en los cuerpos de agua, sino que también ofrece un beneficio económico al generar energía renovable, lo que podría hacer que esta tecnología sea auto sostenible y atractiva para su implementación en áreas mineras.

Esta investigación contribuirá al conocimiento científico y tecnológico en el campo del tratamiento de aguas residuales mediante tecnologías biológicas, y podría servir como base para el desarrollo de prácticas industriales más responsables. Al explorar el uso de CCM para el tratamiento de aguas residuales mineras, este estudio no solo busca mitigar el impacto ambiental de la minería, sino también promover soluciones que favorezcan el bienestar de los ecosistemas (Sanchez et al., 2021). La relevancia de esta investigación radica en el potencial de las CCM para degradar contaminantes presentes en aguas residuales mineras y la generación de bioelectricidad.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

- Evaluar el desempeño de un sistema de celdas de combustible microbianas de doble cámara para el tratamiento y generación de bioelectricidad a partir de agua residual minera y sintética

1.3.2 Objetivos Específicos

- Analizar las características fisicoquímicas del agua residual minera, antes y después del tratamiento.
- Identificar el potencial de generación de bioelectricidad del sistema de celdas de combustible microbianas de doble cámara.
- Determinar la eficiencia del sistema de celdas de combustible microbianas para el tratamiento simultaneo del agua residual minera y sintética.

Capítulo 2

Estado del Arte y la Práctica

2.1 Antecedentes Investigativos

Según (Sanchez et al., 2021), en su estudio: Generación de energía eléctrica y tratamiento de aguas residuales mediante CCM, informa sobre una CCM que implementó un sistema de flujo ascendente en serpentín, la cual además de presentar un mejor porcentaje de reducción en DQO, con un periodo de operación de seis meses con agua residual real como sustrato, nos proporciona las ventajas que una CCM presenta la densidad de potencia menor a una pila de combustible convencionales, no obstante, al utilizar la combinación de grafeno y níquel en la estructura del ánodo ha permitido el crecimiento de las bacterias en los poros del electrodo, logrando de esa forma alcanzar una superioridad en su remediación. Como resultado se obtuvo la reducción de metales pesados en agua residual, especialmente de Cromo (VI), Cobre (II) y Hg (II) los cuales han dado buen resultado en su remoción, la diferencia con el presente estudio, radica en la utilización de microalgas para mejorar la producción de bioelectricidad.

Un estudio realizado por(Lu et al., 2021), denominado: Tratamiento simultáneo de aguas residuales, producción de biomasa de algas y generación de electricidad en celdas microbianas de arcilla para la captura de carbono. Habla sobre el rendimiento de las celdas microbianas de captura de carbono (CCM), que disponen de un separador de arcilla de bajo coste, utilizando algas *Chlorella pyrenoidosa* en la MCC-1 y *Anabaena ambigua* en la MCC-2 y sin algas en una cámara catódica de MCC-3. Como resultado, se obtuvo una mayor producción de energía en la MCC-1 (6,4 W/m³) en comparación con MCC-2 (4,29 W/m³) y MCC-3 (3,29 W/m³). Indicando la superioridad de *Chlorella* sobre la microalga *Anabaena* para la captura de carbono y la producción de oxígeno. La diferencia con el presente estudio, se da en la utilización de para la remoción de metales pesados.

Según (Mahmoud et al., 2022) en su estudio: Conversión de residuos en energía utilizando celdas de combustible microbianas basadas en algas nanoestructuradas. Este trabajo está basado en explotar la utilidad de la biomasa de algas recolectada de un sistema de estanques de algas de alta tasa (HRAP), ya sea como células vivas de algas o como biomasa seca para la producción de bioelectricidad, es decir, las algas actuarán como bioánodo, biocátodo o sustrato nutritivo. Los resultados obtenidos indicaron que se produce una corriente eléctrica más alta cuando las células vivas de microalgas se explotan como biocátodo en una celda de combustible microbiana de doble cámara (DCMFC) con una densidad de potencia neta (250 mW/ m^2) combinada con una eliminación de alta eficiencia de DQO alcanzada el 44,8%. La diferencia de este estudio se da en la utilización de algas en la cámara catódica para la eliminación de contaminantes y metales pesados.

(Y. Zhang et al., 2019) menciona en su trabajo: Sistemas híbridos de celdas de combustible microbianas para el tratamiento de aguas residuales y la producción de bioenergía: efectos sinérgicos, mecanismos y desafíos. Que los sistemas híbridos son más prometedores en comparación con las MFC independientes. Estos sistemas incluyen bioelectro-Fenton-MFC, celda de desalinización microbiana, celda de electrosorción-MFC, celda solar microbiana, celda de electrodiálisis inversa microbiana, MFC-planta y MFC-humedal construido. Se evalúan los efectos sinérgicos y los mecanismos de acoplamiento de procesos, así como los desafíos para las aplicaciones prácticas de cada sistema híbrido. Aunque los sistemas híbridos MFC son más prometedores que los MFC independientes, se necesita mucha más investigación para superar obstáculos significativos para la implementación práctica.

(Ezziat et al., 2019) habla sobre los Desafíos de la arquitectura de celdas de combustible microbianas para la recuperación y eliminación de metales pesados de aguas residuales. En el cual indica que en las cámaras catódicas bióticas/abióticas no solo pueden

eliminar, sino también recuperar metales pesados. Se emplearon MFC de una y dos cámaras para la eliminación de metales pesados, en la cámara anódica se descompone la materia orgánica que sirve como donante de electrones, mientras que la eliminación de metales pesados se da en la cámara catódica. Como resultado generó una densidad de potencia máxima de 150 mW/m^2 con una tasa de reducción de $0,67 \text{ g/m}^3 / \text{h}$ a una concentración de 200 mg Cr(VI)/L . Con el uso de un puente salino rentable en lugar de una membrana costosa como Nafion o Ultrex, redujeron el total de 5 mg/L de cromo y el 80% de 10 mg/L con una densidad de potencia máxima de $92,65$ y $75,08 \text{ mW/m}^2$, respectivamente.

2.2 Fundamentación Legal

De acuerdo a la Normativa Ambiental del Ecuador el acuerdo ministerial 097A, en el Art. 201, que se titula: “De las autorizaciones de emisiones, descargas y vertidos”, del libro VI de Anexo 1. Recurso Agua. se menciona que no se autorizarán descargas ya sean aguas servidas o industriales, sobre cuerpos hídricos, cuyo caudal mínimo anual, no pueda soportar la descarga; es decir, sobrepase la capacidad de carga del cuerpo hídrico. El Art. 202 Reporte, especifica que el Sujeto de Control que origine descargas, emisiones o vertidos hacia el ambiente, incluyendo sistemas de alcantarillado, deberá reportar a la Autoridad Ambiental Nacional con la periodicidad que establece el régimen de evaluación de impactos ambientales.

El Art. 216 Tratamiento de aguas residuales urbanas y rurales, el cual menciona que la Autoridad Ambiental Competente en coordinación con la Agencia de Regulación y Control del Agua, verificará el cumplimiento de las normas técnicas en las descargas provenientes de los sistemas de tratamiento implementados por los Gobiernos Autónomos Descentralizados. La gestión y el mantenimiento de sistemas de tratamiento de agua deberán ser monitoreados y evaluados por medio de los mecanismos de control y seguimiento establecidos en el Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria.

Art.57.- El derecho humano al agua es el derecho de todas las personas a disponer de agua limpia, suficiente, salubre, aceptable, accesible y asequible para el uso personal y doméstico en cantidad, calidad, continuidad y cobertura. Forma parte de este derecho el acceso al saneamiento ambiental que asegure la dignidad humana, la salud, evite la contaminación y garantice la calidad de las reservas de agua para consumo humano.

2.3 Fundamentación Teórica

2.3.1 *Sistemas bioelectroquímicos (BES)*

Son considerados como tecnologías emergentes que integran procesos biológicos y electroquímicos para la conversión y tratamientos de compuestos tóxicos presentes en diversos tipos de aguas residuales. Estos sistemas se fundamentan en la capacidad que tienen los microorganismos para catalizar diferentes reacciones electroquímicas mediante su metabolismo y facilitar la transferencia de electrones entre los sustratos, en particular, las reacciones que requieren de una transferencia de electrones entre los sustratos y los electrodos, permitiendo la generación de energía eléctrica por los procesos de óxido-reducción con el propósito de estimular y modificar el metabolismo microbiano (Martínez et al., 2019).

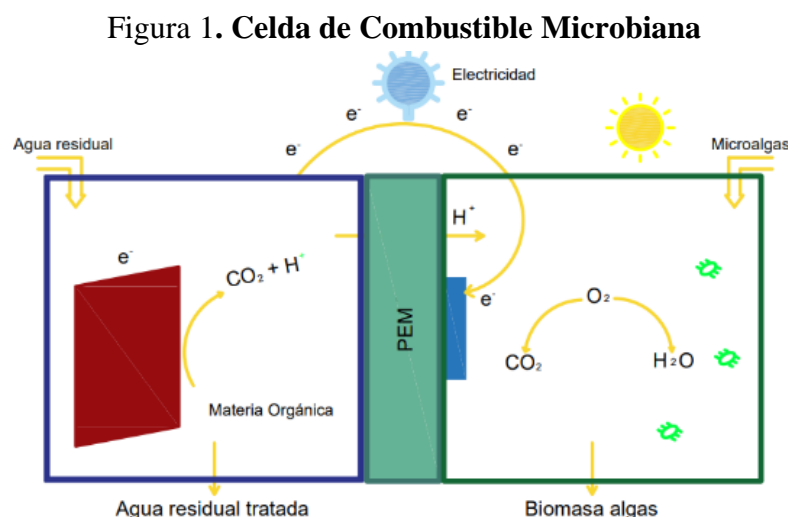
2.3.2 *Celdas de Combustible Microbianas (CCM)*

Son considerados como BES, las CCM son una tecnología bioelectroquímica que utiliza microorganismos como catalizadores para convertir la energía química, presente en la materia orgánica, en energía eléctrica. Este innovador sistema posibilita la conversión de energía química de compuestos orgánicos e inorgánicos presentes en aguas residuales en electricidad, mediante los microorganismos que son utilizados como catalizadores directos. Esto se produce en condiciones en las que algunos microorganismos transfieren los electrones producidos por su actividad metabólica a un electrodo llamado ánodo, en lugar

de a un aceptor natural de electrones como es el oxígeno, este proceso contribuye a degradar la materia orgánica representada como sustrato o combustible, el cual genera electrones, CO_2 y protones (H^+) (Lumba & Porras, 2020).

2.3.3 Celdas de Combustible Microbianas de Doble Cámara

Una CCM de doble cámara están constituidas principalmente por dos compartimientos separados, uno anódico y otro catódico, por la membrana de intercambio protónico (MIP) o puente salino, en la figura 1 se observa la configuración de la CCM denominada tipo H según (Lumba & Porras, 2020). En la cámara anódica se suministran sedimentos y agua residual minera donde los microorganismos metabolizan el sustrato generando electrones, CO_2 y H^+ , en la cámara anódica se coloca el electrodo catódico para que esta favorezca las relaciones entre el oxígeno atmosférico, electrones y los H^+ que son difundidos a través de la MIP, en donde los electrones son captados por el ánodo y posteriormente transferidos hacia el cátodo mediante un circuito externo (Sanchez et al., 2021).



Fuente: (Sanchez et al., 2021).

2.3.4 Clasificación

Las CCM son dispositivos bioelectroquímicos, en donde se da la conversión de energía química de compuestos orgánicos e inorgánicos en electricidad, utilizando la actividad metabólica de los microorganismos como catalizadores para transferir electrones. Las CCM constan de dos cámaras separadas por una membrana selectiva. Existen diversos diseños, sin embargo, los más utilizados son:

2.3.4.1 Celdas de Combustible Microbianas Heterótrofas.

Las CCM heterótrofos generan energía eléctrica gracias al proceso metabólico de la respiración microbiana, en el cual se requiere de un suministro de materia orgánica o sustrato, mismas que constan por una cámara anódica y una catódica, separadas por una MIP, la cual permite el paso de CO_2 , H^+ u otros cationes al cátodo. Debido a la diferencia de carga, los electrones son transportados a la cámara catódica por medio de un circuito eléctrico externo conecta al ánodo y cátodo de tal manera, que los microorganismos oxidan la materia orgánica de la cámara anódica completando la respiración y a su vez transfieren electrones al ánodo, el rendimiento de las CCM heterótrofas también dependerá de factores como la composición del sustrato y condiciones de operativas y diseño del sistema (Chen et al., 2020).

2.3.4.2 Celdas de Combustible Microbianas fotosintéticas.

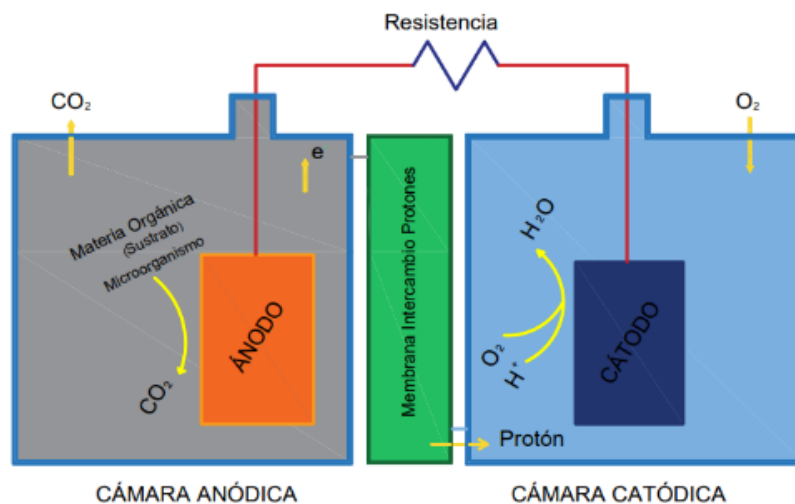
Las CCM fotosintéticas son conocidas como células bio-solares, ya que producen energía eléctrica basado en reacciones biocatalíticas por organismos fotosintéticos, entre los más conocidos algas o cianobacterias. La fotosíntesis, donde los microorganismos capturan energía del sol para convertir el dióxido de carbono CO_2 y agua (H_2O), en oxígeno (O_2) y carbohidratos necesarios para la respiración celular. En donde se liberan los electrones hacia las vías de transferencia extracelulares y el flujo eléctrico al cátodo por medio del circuito

eléctrico externo. A su vez los H^+ liberados se difunden desde la cámara anódica a la catódica (Obileke et al., 2021). De esta manera sea posible la generación de electricidad a partir de energía solar sin necesidad de materia orgánica. (Zieliński et al., 2024).

2.3.5 Componentes de una celda de Combustible Microbianas

Las CCM están compuestas por dos cámaras, una anódica y catódica, la cual contienen al ánodo y cátodo respectivamente, separadas por MIP, como se muestra en la figura 2, en donde los microorganismos presentes en la parte anódica degrada la materia orgánica de forma anaerobia con el fin de liberar electrones (Fan et al., 2018). De esta manera los electrones son transportados al cátodo por medio de un circuito externo, de esta forma los protones generados, serán selectivamente conducidos por la MIP hacia la cámara catódica. Ambos productos dados en la cámara anódica pasarán al cátodo y reaccionarán con el O_2 para producir H_2O (Tay et al., 2022).

Figura 2. Celda de Combustible Microbiana de doble Cámara



Fuente: (Tay et al., 2022).

Los materiales que se utilizan en la construcción en las cámaras para las CCM son vidrio, policarbonato, teflón, acrílico y plexiglás. Con el fin de lograr una eficiente transferencia de electrones y adhesión microbiana, se debe considerar la forma y porosidad de la superficie del electrodo. Se utilizan comunmente papel, tela de carbón, grafito, fieltro

de grafito, acero inoxidable, cerámica, platino y materiales catalíticos para los electrodos (Mirquez et al., 2021). La cámara anódica debe alimentarse de sustratos orgánicos e inorgánicos, que serán utilizados por los microorganismos para producir electrones que fluirán al cátodo por un circuito externo, por otra parte, debido a las características biológicas de CCM, los electrodos deben promover la adhesión celular y poseer una tendencia limitada a la contaminación tanto química y biológica, siendo el material de carbono el más utilizado, debido a su rentabilidad y facilidad de producción (Obileke et al., 2021).

2.3.5.1 Ánodo

Es un electrodo en el que se llevan a cabo las reacciones de oxidación y reducción de la materia orgánica presente en el sustrato, en la cámara anódica, los electrodos utilizados pueden ser a base de fibra de carbono, tela, grafito, fieltro de grafito y cerámica. Estos materiales tienen una alta conductividad y parecen ser adecuados para el crecimiento bacteriano y la formación de biofilm, la fibra de carbono es rígida y ligeramente quebradiza de fácil manipulación, lo cual permite se conecte fácilmente al alambre de titanio para la transferencia de electrones mediante un circuito externo para su monitoreo (Michelin Kiruba N et al., 2024).

2.3.5.2 Cátodo.

El cátodo es un electrodo en donde tiene lugar la reacción de reducción del oxígeno, siendo el receptor de electrones más apropiado para una CCM por su elevado potencial de oxidación, su accesibilidad, su coste reducido, su sostenibilidad y la ausencia de productos contaminantes, dado que el resultado generado es la formación de H₂O (Rojas et al., 2021). La selección de los materiales catódicos influye significativamente en el desempeño de las CCM. El material más frecuentemente empleado es fibra de carbono que ha sido precargada comercialmente con un catalizador de platino.

2.3.5.3 Membrana de intercambio de protones (MIP)

La MIP es un elemento crucial del sistema ya que obstaculiza el paso de electrones de la cámara anódica a la catódica y permite el paso de los protones. Existen diversas clases de membranas, como la de intercambio de cationes (MIC), membrana de intercambio de aniones, la bipolar, la de microfiltración, la de ultrafiltración, el puente salino, las membranas porosas y otros materiales para el filtrado (Cárdenas et al., 2022). El Nafion 117 es la MIP más frecuentemente empleada; código 117 se emplea para diferenciar el espesor de la membrana (0,019 cm) de otros. Esta membrana fue creada para ser utilizada en un celda de combustible de hidrógeno (HFC), por lo que se optimizó para generar un entorno estable y conductor para elevadas concentraciones de protones (Cárdenas et al., 2022).

2.3.5.4 Fibra de carbono

Es un material ampliamente utilizado en las CCM debido a sus propiedades electroquímicas, mecánicas y de durabilidad. Es un elemento creado por fibras específicamente compuestas de átomos de carbono con un diámetro de 10 a 50 micrómetros, lo que otorga una resistencia considerable, resaltando su excelente conductividad eléctrica y su área superficial para la formación de la biopelícula de microalgas o biopelículas microbianas, se emplea principalmente como material para electrodos, facilitando la transferencia de electrones y protones (Cuadrado et al., 2022).

2.3.6 *Microorganismos*

Los microorganismos son diminutos organismos vivos de cuyo estudio se encarga la microbiología. De hecho, son tan pequeños que no son perceptibles con la vista humana y se requiere de un microscopio para visualizarlos y analizarlos. La composición de los microorganismos es bastante sencilla y alberga especies beneficiosas, patógenas y otras que varían dependiendo de las condiciones. Por lo general, los microorganismos Gram negativos

se clasifican dentro de la categoría de electrogénos que tienen una capa celular externa que se ajusta al sistema. (Doan et al., 2023).

2.3.6.1 Microorganismos en las CCM

Para una transferencia de electrones eficaz en las CCM, es necesario crear una biopelícula en la superficie del ánodo. Las especies que constituyen la mayoría de la población de microorganismos son: *Geobacter*, *Shewanella* además de *Proteobacter*, *Pseudomonas*, *Firmicutes*, *Acidobacteria* y el reino de los hongos (M. Li et al., 2019). Sin embargo, las bacterias fotosintéticas son igualmente eficientes en estos sistemas gracias a su capacidad para la eliminación del dióxido de carbono. Se ha sugerido la relación sinérgica entre bacterias fotosintéticas y heterótrofas, siendo crucial en este aspecto destacar la utilización de microalgas como *M inermum* (Doan et al., 2023). finalmente, se han empleado cultivos combinados de poblaciones microbianas, como la comunidad microbiana natural de microorganismos presentes en aguas residuales domésticas (Yang & Chen, 2021).

2.3.6.2 Microalgas

Son microorganismos eucariotas unicelulares que poseen un solo núcleo, capaces de realizar la fotosíntesis, pueden transformar la energía luminosa en energía química (M. Li et al., 2019). Las microalgas, en su papel de descontaminantes, brindan múltiples beneficios como bajos costos de producción, fácil manipulación, no son contaminantes y permiten la extracción de contaminantes, razón por la cual no se les considerados una fuente de residuos secundarios (Mahmoud et al., 2022). Investigaciones llevadas a cabo con variedades de especies de microalgas en solitario o en consorcio, tales como *Chlorella*, *Scenedesmus*, *Nostoc*, *Cladophora*, *Chlamydomonas*, *M inermum* o las cianobacterias. *Spirulina*, *Anabaena* logran elevadas capacidades para eliminar contaminantes, especialmente en sólidos totales disueltos, DBO5, DQO, NO₂, NH₃ y PO₃⁻ (García et al., 2019).

2.3.7 Bioenergía

Se referencia a la energía renovable, producida a partir de múltiples recursos biológicos. Existen diversas tecnologías que se centran en la generación de energía que acumulan los residuos orgánicos, como: la metanogénesis, el biohidrógeno y la bioelectricidad. En las últimas décadas, la bioelectricidad ha experimentado un aumento significativo debido a su potencial eléctrico, originado por los procesos biológicos de microorganismos, lo que ha generado como resultado de manera simultánea la biorremediación y el almacenamiento de energía eléctrica (Yang & Chen, 2021).

2.3.8 Aguas residuales.

Son aquellas aguas residuales que son descargas al ambiente sin tratamiento previo, poniendo en riesgo el equilibrio ecológico, ya que provocan la eutrofización de las aguas superficiales por los contaminantes vertidos en el agua y desde ellas se pueden transmitir enfermedades, hacia los ser humanos, animales y plantas. Dentro de un marco legal, la Ley de Aguas Nacionales la define como “las derivadas de las descargas de uso público, domestico, industrial, comercial, agrícola, pecuario, de las instalaciones de tratamiento y combinación de estas”. De manera general, las aguas residuales poseen una extensa diversidad de agentes contaminantes, microorganismos patógenos, contaminantes metálicos y orgánicos (Munoz et al., 2020).

2.3.9 Agua residual minera

En el sector minero, las aguas residuales pueden producirse de diversas maneras, dependiendo de factores como el proceso de tratamiento, si la explotación minera se realiza de forma subterránea o a cielo abierto, el agua de mina a menudo alberga varios componentes y es susceptible a la contaminación, ya que puede contener metales disueltos,

ácidos libres, metales pesados, materia orgánica, productos químicos de alta salinidad o compuestos nitrogenados (Osorio et al., 2020).

2.3.10 Tratamientos del agua residual minera

2.3.10.1 Tratamiento físico químicos

Para poder alcanzar la sostenibilidad ambiental a futuro en lo que respecta a las actividades mineras, es necesario aplicar tecnologías efecaces y eficientes que faciliten el manejo de la remediación de los pasivos mineros. Los productos químicos neutralizantes, como la piedra caliza y la cal apagada, son frecuentemente utilizados para tratar el drenaje ácido de mina, ya que facilitan la reduccion de la acidez extrema y precipitación de los iones de metales/metaloides venenosos disueltos como hidróxidos. Aunque producen una remediación eficaz, las grandes cantidades de lodos o relaves generan precipitaciones que contienen metales pesados y metaloides, los cuales se categorizan como materiales peligrosos y necesitan una remoción más segura (Ai et al., 2020).

2.3.10.2 Tratamientos biológicos

Las tecnologías de remediación, tales como la biorremediación, la fitorremediación, la electrodiálisis, los humedales y la adsorción, también se aplican para el manejo de residuos de la minería. No obstante, suponen dificultades debido a la escasa eficiencia de remediación o un alto costo para su ejecución. Adicionalmente, ciertas tecnologías generan nuevos residuos, como lodos, salmueras y medios consumidos, que necesitan un tratamiento extra, antes de ser vertidos en un curpo hidrico (Ai et al., 2020). las CCM son una tecnología biológica sostenible.

2.3.11 Biorremediación

Son procedimientos biotecnológicos donde se emplean organismos vivos para disminuir o eliminar sustancias químicas dañinas, tóxicas u otros residuos peligrosos

convirtiendo contaminantes orgánicos e inorgánicos en compuestos con escasa o, en el mejor de los casos sin contaminación. Estos procedimientos se utilizan para curar, remediar suelos, agua o también se pueden llevar a cabo procesos más sofisticados como es la generación de bioelectricidad y tratamiento de aguas residuales.

Capítulo 3.

Diseño Metodológico

3.1 Enfoque de la Investigación

Esta investigación presenta un enfoque mixto, este tipo de enfoque se caracteriza por la recolección de datos para probar hipótesis, con base en la medición numérica y análisis estadístico, para establecer patrones de comportamiento y probar teorías, mediante el análisis y la interpretación de los resultados obtenidos.

3.2 Diseño de la Investigación

La investigación sigue un diseño experimental, en el cual se examinan relaciones específicas entre variable controladas en un ambiente regulado, en este caso, la variable independiente es la composición de CCM de doble cámara en función de la concentración celular de microalgas fotosintéticas empleadas en el sistema y la variable dependiente, por su parte, se enfoca en dos resultados, la generación de bioelectricidad y la eficiencia en la remoción de contaminantes de agua residuales, tanto mineras como sintéticas. Los resultados se expresarán en valores numéricos.

3.3 Tipo de investigación

3.3.1 *Por su alcance*

Esta investigación es aplicada, se enfocó en aplicar los conocimientos científicos y tecnológicos existentes, ya que abarca el estudio del desempeño de un sistema de celdas de combustible microbianas de doble cámara en dos áreas interrelacionadas: generación de bioelectricidad y el tratamiento de aguas residuales mineras y sintética. Este estudio podría involucrar la caracterización de las propiedades electroquímicas del sistema, el análisis de la eficiencia en la generación de bioelectricidad y la evaluación de la eficiencia en la remoción de contaminantes en el agua residuales mineras.

3.3.2 *Por su diseño*

La investigación tiene un enfoque experimental, ya que tiene como propósito generar resultados prácticos y aplicables en el ámbito de la bioelectricidad y tratamiento de agua residual, tanto mineras como sintéticas. Se implementa un sistema de CCM de doble cámara que permita estudiar la eficiencia de los microorganismos fotosintéticos en la producción de energía y en la remoción de contaminantes presentes en las aguas residuales. Este diseño experimental es fundamental para evaluar el desempeño y la capacidad de los microorganismos en términos de generación de bioelectricidad y la remoción de contaminantes.

3.4 Área de estudio

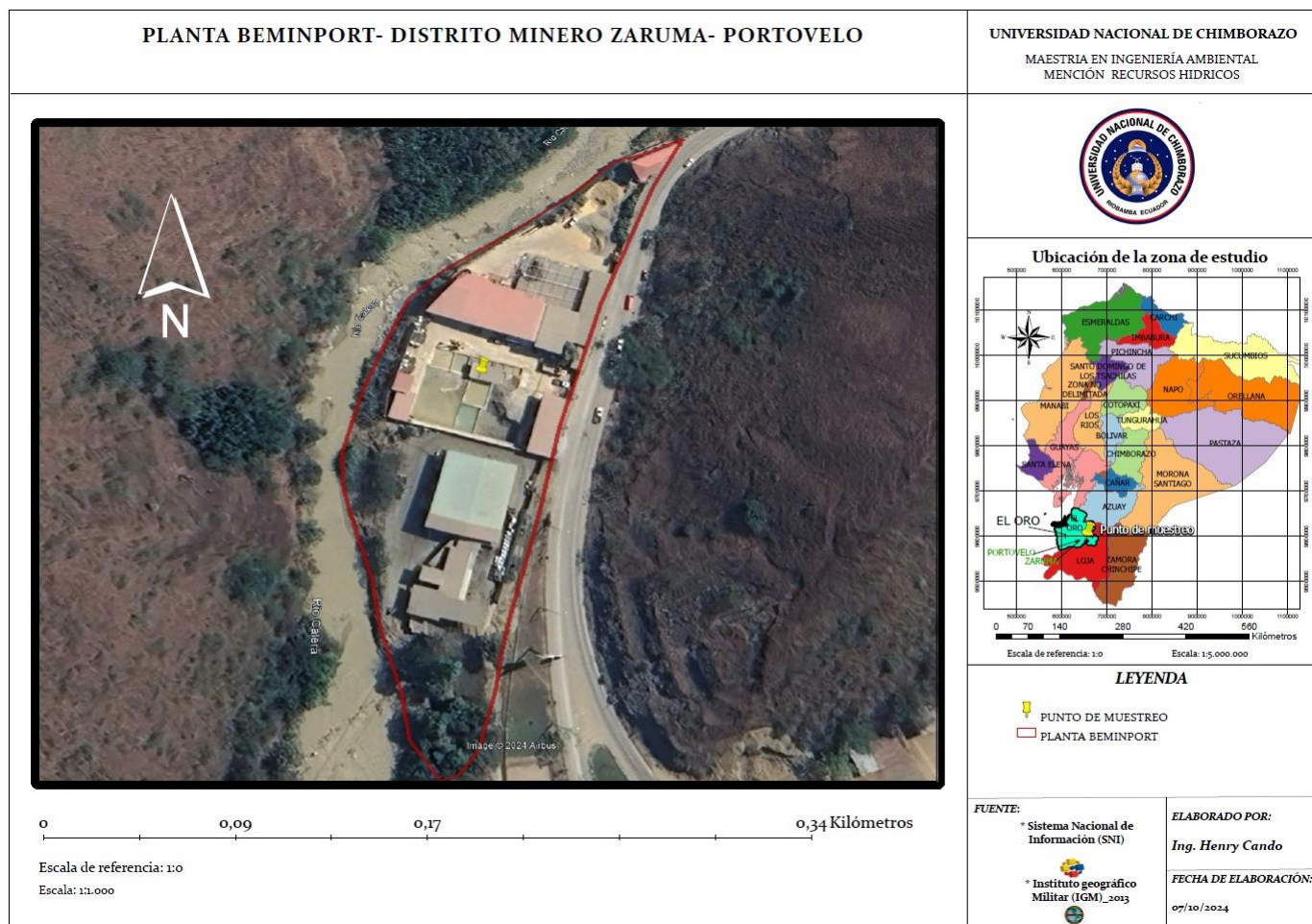
El área de estudio de esta investigación se centra en el análisis de las aguas residuales provenientes de las actividades mineras realizadas en la Planta de Bemimport, ubicada en el Distrito Minero de Zaruma-Portovelo, en la provincia de El Oro, Ecuador. Este distrito reconocido a nivel nacional por su intensa actividad minería artesanal, representando una fuente significativa de empleo y desarrollo económico para la región, localizada a una altitud de 2600 msnm, abarca una extensión aproximada de 69 ha, la población del distrito asciende a 91,376 habitantes, quienes se ven directamente impactados por la actividad minera y sus implicaciones medioambientales.

3.5 Técnicas e Instrumentos de muestreo y recolección de datos

Para seleccionar los puntos de muestreo, se utilizó Sistemas de Información Geográfica, junto con una salida de campo a la zona de estudio Bemimport. Donde se realizó el muestreo del agua residual minera. Para la toma de muestras se emplearon recipientes de polietileno con tapa, previamente etiquetados; para evitar un cambio en los valores de DQO, las muestras se acidificaron (pH~2) y conservaron a 4 °C, de acuerdo a la norma NTE INEN

2169:2013; posteriormente fueron llevadas al Laboratorio de Biotecnología de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH, para la identificación de contaminantes y el montaje experimental de la CCM de doble cámara (INEN, 2013).

Figura 3. Planta de procesamiento Bemimport, Zaruma-Portovelo



Fuente: Autor

3.6 Análisis fisicoquímicos del agua residual

Se realizaron los análisis *in situ* de pH, temperatura y conductividad en el momento de la toma de muestras del agua residual minera proveniente del proceso de cianuración, con el uso de un multiparametro (PC2700). De igual manera los análisis químicos de las muestras de agua residual minera se realizaron en el Laboratorio de Calidad del Agua de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH. Los parámetros analizados fueron: Nitritos (NO_2^-), Nitratos (NO_3^-), Sulfatos, fosfatos (PO_4^{3-}), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅),

Demanda Química de Oxígeno, Mercurio (Hg) y Plomo (Pb) (J. Li et al., 2022). Mediante los siguientes métodos y normas, como se puede observar en la siguiente tabla 1.

Tabla 1.-Parámetros fisicoquímicos analizados en el laboratorio

ENSAYO	MÉTODO/NORMA
Nitritos	PE-AL-41 Standard Methods Ed.23.2017, 4500 NO2 B HACH DR 2800
Nitratos	PE-AL-40 Standard Methods Ed.23.2017, 4500 NO3 A HACH DR 2800
Sulfatos	PE/AL/25 Standard Methods Ed.23.2017 4500 E SO4 HACH DR 2800
Fosfatos	
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)	PE/AL/28 Standard Methods Ed.23.2017 5210B
Demanda Química de Oxígeno	PE/AL/05 Standard Methods Ed.23.2017 5220D
Mercurio	EPA 7470 A SM 3112 B/PEBMTLAB-68
Plomo.	SM 3113 B/ BMTLAB-69.

Fuente: Autor

3.6.1.1 Nitritos

Se realizo una dilución de la muestra, tomando 10 mL y aforando en 100 mL en un balon, porteriormente se realizo una segunda dilucion tomando 10 mL de la muestra aforada y volviendo aforar a 100 mL. Para el analisis se toma 10mL de la muestras en un tubo de ensayo y se adiciona el reactivo NITRITE LR, se agita la muestra por 1 minuto y se deja en reposo por 20 minutos para su posterior medición, mediante el espectrofotómetro (HACH DR2800), se llena la cubeta con 10mL de muestra del tubo de ensayo con el reactivo (J. Li et al., 2022).

3.6.1.2 Nitratos

Para ello, se realizó una dilución de la muestra, tomando 10 mL y aforando en 100 mL en un balon. Para el analisis se toma 10mL de la muestras en un tubo de ensayo y se adiciona el reactivo NITRATE HR, se agita la muestra por 2 minuto y se deja en reposo por un periodo de 5 minutos para su posterior medición, la cual se realiza en el espectrofotómetro (HACH DR2800), para ello, se procede a llenar la cubeta con 10 mL de muestra del tubo de ensayo con el reactivo.

3.6.1.3 Fosfatos

Para ello, se realizo una dilucion de la muestra, tomando 10 mL y aforando en 100 mL en un balon. Para el analisis se toma 10mL de la muestras en un tubo de ensayo y se adiciona el reactivo FHOSPHA TE RGT, se agita la muestra por 1 minuto y se deja en reposo por un periodo de 2 minutos para su posterior medición, la cual se realiza en el espectrofotómetro (HACH DR2800), para ello, se procede a llenar la cubeta con 10 mL de muestra del tubo de ensayo con el reactivo (Sanchez et al., 2021).

3.6.1.4 Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5) y Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Se tomo 10 mL de la muestra y se afor con 90ml de agua destilada en un balon de 100 mL. Porteriormente se tomo los 95mL de la muestra diluida y se coloco en 4 botellas ambar, se llevo hacia el equipo digestor de DBO (BOD TRANKTM II), durante un periodo de 5 dias para determinar la demanda bioquimica de oxígeno que una bacteria requiere. Por otra parate para la determinación de la DQO, se coloco 2 mL de la muestra en un vial previamente preparado con dicromato de potacio ($K_2Cr_2O_7$), ácido sulfúrico (H_2SO_4) y sulfato de plata (Ag_2SO_4), se agito por 1 minuto y posteriormente la muestra se coloco en un digestor Lovibond RD durante 2 horas con una temperatura de 150 °C. Posteriormente

pasado las dos horas la muestra se lleva a un espectrofotómetro (HACH DR2800), para su analiza final (Ccora et al., 2020).

3.6.1.5 Metales pesados

Para la determinacion de metales pesados se utilizó 400 mL de agua residual minera previamente acidificada estabilizando un Ph de 2 para la conservacion de los metales en la muestra de agua, posteriormente para la determinación de los metales pesados como el mercurio y plomo se utilizo metodos estandarizados. Para el mercurio se utilizo el procedimiento EPA 7470 A SM 3112 B/PEBMTLAB-68 y para el plomo SM 3113 B/BMTLAB-69 teniendo un rango de lectura < 0,001.

3.7 Preparación del medio de cultivo para el crecimiento de microalgas

El medio de cultivo seleccionado fue BG11. Con la composición (en g/l) sugerida por: 1,5 NaNO₃ , 0,04 K₂HPO₄ , 0,075 MgSO₄ · 7H₂O, 0,036 CaCl₂ · 2H₂O, 0,006 ácido cítrico, 0,006 citrato de amonio férrico, 0,001 EDTA y 0,5 NaHCO₃. Para la producción de biomasa de la microalga se utilizaron botellas de vidrio de 500 mL, en la cual se colocó 450 mL del medio (BG11), y 50 mL del inoculo puro de la microalga *M inermun*, de igual manera se controló las condiciones de laboratorio como la temperatura de 25 °C, periodos de luz y oscuridad de 12 horas cada uno, una intensidad lumínica de 1500 luxes y una aireación continua con una bomba de pecera.

Figura 4. Preparación del medio de cultivo (BG11)

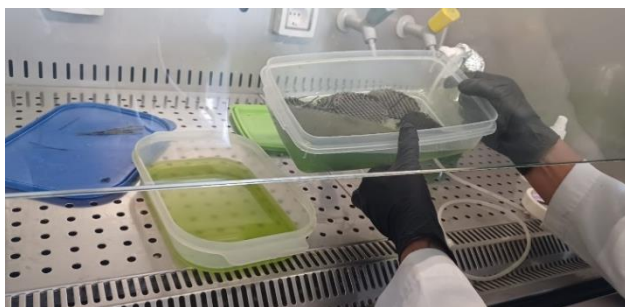


Fuente: Autor

3.8 Formación de biofilm en el cátodo

La solución que permite el crecimiento del biofilm en el cátodo fue el medio BG11 en la cual la fibra de carbono cortada y pre tratada previamente con un diámetro de 6cm fue sumergida en cultivos puros de microalgas *M. inermum*, en un recipiente plástico, el cual fue cultivado durante un periodo de siete días, proporcionando las condiciones óptimas para su desarrollo como una temperatura de 25 °C, fotoperiodos de luz y oscuridad de 12 horas y aireación continua, en el que se pudo observar la formación de colonias sobre la fibra de carbono de color verde (Andrango et al., 2020).

Figura 5. Cátodo sumergido en cultivo puro de microalga



Fuente: Autor

3.9 Pretratamiento del ánodo y cátodo

Se utilizó fibras de carbono, tanto para el ánodo como cátodo, los ánodos presentaron una configuración rectangular con dimensiones de 21×7 cm, el cual se pre trató colocando en remojo en acetona durante una noche y al siguiente día se lavó 5 veces con agua destilada, posteriormente se colocó en una solución preparada con 500 mL de peróxidisulfato de amonio (100 g) y ácido sulfúrico concentrado (50 mL), durante 15 minutos, los electrodos se calentaron en una mufla a 450 °C durante 30 minutos. Los cátodos presentaron configuraciones circulares con un diámetro de 6 cm, de manera similar se humedecieron en agua destilada en la noche con el fin de eliminar las impurezas.

Figura 6. Anodo sumergido en solución de peroxidisulfato de amonio y ácido sulfúrico

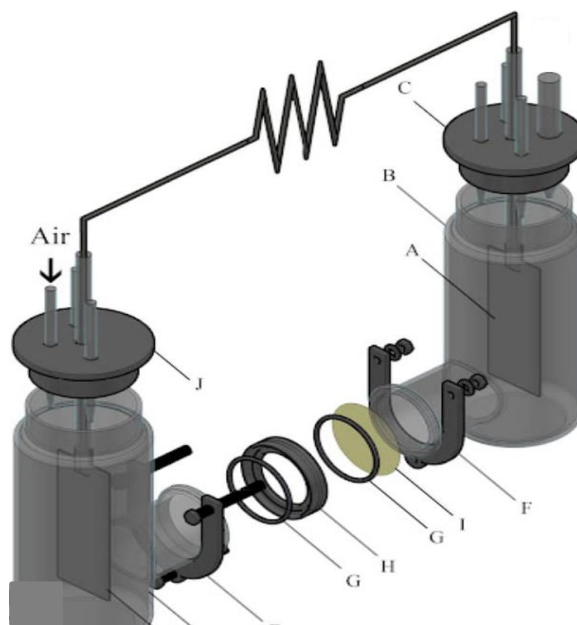


Fuente: Autor

3.10 Diseño y Construcción de las CCM de doble cámara

El diseño de la CCM se basó en investigaciones anteriores donde se consideró una distancia mínima entre los electrodos. Para la experimentación se armaron 4 CCM de doble cámara, las cuales fueron construidas usando 8 frascos de vidrio con tapas, las cuales se unieron mediante un puente hecho con Nylon. La cámaras anódica y catódica tenían un diámetro interno del frasco 27 cm y una altura de 18 cm respectivamente.

Figura 7: Configuración de CCM de doble cámara



En la cámara anódica se colocó la fibra de carbono pretratada anteriormente, con una configuración rectangular con dimensiones de 21 x 10cm, la cual fue tejida con alambre de

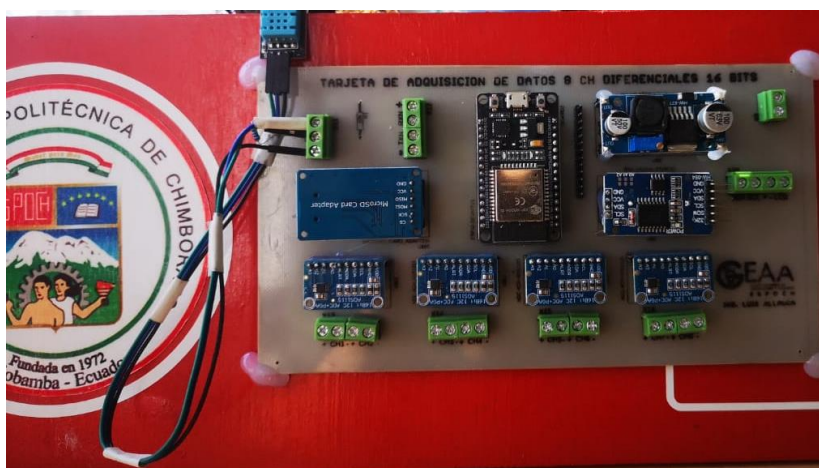
platino, en la cámara anódica se añadió 50gr de relaves mineros con 25 mL de peptona, y el sustrato de 450 mL del agua residual minera. Posteriormente en el puente de separación de las dos cámaras se colocó la MIP de celofán. En la cámara catódica se utilizó fibra de carbono con una configuración circular de 6 cm de diámetro de igual manera se tejó con alambre de platino, luego se añadió un nuevo sustrato que contenía 500 mL de agua residual sintética (BG11) y se colocó 50 mL de la microalga *M. inermum*, luego se instaló una manguera para su aireación mediante una bomba de pecera (Andrango et al., 2020). Después se instaló un circuito externo que conectaba tanto el ánodo como el cátodo para su monitoreo.

3.11 Evaluación de CCM de doble cámara

3.11.1.1 Voltaje

La CCM de doble cámara fueron monitoreadas mediante el empleo de una tarjeta de adquisición de datos la cual fue de elaboración propia por el Grupo de Energías Alternativas y Ambiente (GEAA), empleando un procesador ESP32 para gestionar 2 módulos de conversión ADC en la lectura de las 4 CCM, la fuente de energía del sistema fue proveída por un sistema fotovoltaico para garantizar la adquisición continua del voltaje en milivoltios generado en cada celda, a intervalos de 1 minutos, por un periodo de 23 días, posteriormente los voltajes fueron almacenados en una tarjeta Micro Sd de 16 GB y a su vez en una plataforma IoT de acceso libre como Thingspeak para poder monitorear de forma remota mediante internet el desempeño de las CCM.

Figura 8. Tarjeta de adquisición de datos



Fuente: Autor

3.11.1.2 Medidas electroquímicas

La gráfica de la diferencia de potencial vs densidad de corriente fue calculada utilizando la ley de ohm a partir de los datos del voltaje medido a circuito cerrado utilizando resistencias de 50 - 20000 Ω . Para la densidad de corriente se consideró la superficie de la celda que fue determinada mediante adicionar valor de la superficie y diámetro. De igual manera se procedió para la gráfica densidad de potencia vs densidad de corriente.

3.11.1.3 Porcentaje de remoción de contaminantes

El porcentaje de remoción de los contaminantes se evaluado mediante la eficiencia en la degradación de compuestos orgánicos en la cámara anódica y catódica, lo que puede medirse como una disminución de los parámetros analizados antes y después del tratamiento como (NO_2^-), (NO_3^-), (PO_4^{3-}), (DBO5), (DQO), (Hg) y (Pb). El cual se determinó utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{Porcentaje de Remocion} = \left(\frac{C_{\text{Inicial}} - C_{\text{final}}}{C_{\text{inicial}}} \right) \times 100$$

3.12 Población y Muestra

3.12.1 Población

La población de estudio esta constituida por un volumen de 3,78 litros de agua residual minera, recolectada de las piscinas de sedimentacion de la Planta de Bemimport, Ubicada en el Distrito Minero de Zaruma-Portovelo, en la provincia de el Oro, Ecuador. Esta agua residual es un subproducto caracteristico de la extraccion de minerales, especialmente oro, mediante procesos que involucran reactivos quimicos para libera el metal valioso de su fuente mineral.

3.12.2 Tamaño de la Muestra

El tamaño de la muestra de agua residual se ha determinado en 450 mL para cada una de las CCM de doble camara utilizadas en este estudio. Este volumen ha sido cuidadosamente seleccionado para garantizar que las condiciones experimentales sean optimas y representativas de las características del agua residual recolectada en el proceso de cianuracion. La eleccion de este volumen de 450 mL permite realizarmediciones precisas de los parametros de generacion de bioelectricidad y eficiencia en la remocion de contaminantes.

Capítulo 4

Análisis y Discusión de los Resultados

4.1 Análisis Descriptivo de los Resultados

4.1.1 Características fisicoquímicas del agua residual minera y sintética

Los análisis, (tabla 2) muestran los resultados de la caracterización fisicoquímicos del agua residual minera, en donde se observa que la muestra analizada sobrepasa los límites establecidos en la Norma de Calidad ambiental y de descarga de efluentes: Recurso Límites de Descarga a un cuerpo de agua dulce, especialmente de los metales pesados como el Hg, Pb, la DQO y la DBO5 sobre pasa los valores límites.

Tabla 2: Caracterización fisicoquímica del agua residual minera.

Parámetros	Unidad	Límite permisible	Muestra inicial	Muestra final CCM5	Muestra final CCM6	Muestra final CCM7	Muestra final CCM8
pH	-	5-9	7,09	7,81	7,66	7,66	7,59
Conductividad	mS	-	3,017	2,707	1,196	1,146	1,956
Sólidos Totales	ppt	1600	1757	1,793	1,861	1,829	1,723
Nitritos	mg/L	10	122.2	46.5	76,5	79	71,5
Nitratos	mg/L	10	200	290	30	30	28
Fosfatos	mg/L	-	0,52	445	43	7	68
DBO	mg/L	100	3000	52	44	20	20
DQO	mg/L	250	2400	50	10	9	10
Mercurio	mg/L	0.005	141,6	0,26	0,13	0,05	0,01
Plomo	mg/L	0.2	1.976,7	0,10	0,06	0,0	0,0

Fuente: Autor

En la tabla 3 se muestra los resultados de los análisis fisicoquímicos del agua sintética y su reducción en la CCM5, CCM6, CCM7, CCM 8 al finalizar su tratamiento. Los análisis muestran que el agua sintética sobrepasa los límites establecidos en la Norma de Calidad ambiental y de descarga de efluentes: Recurso Límites de Descarga a un cuerpo de agua dulce, especialmente de (NO_2^-) , (NO_3^-) y (PO_4^{3-}) .

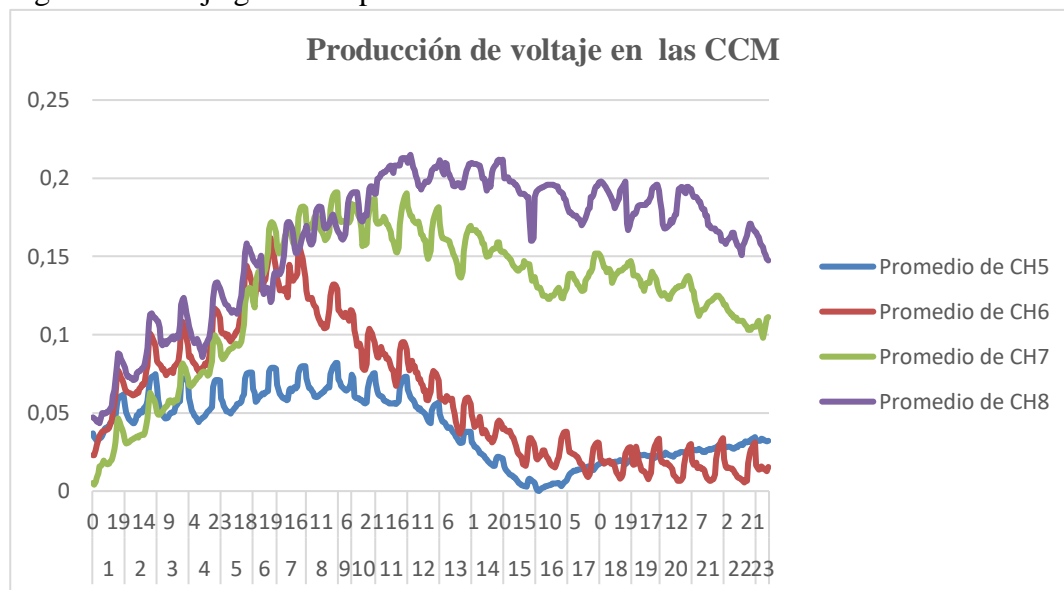
Tabla 3: Caracterización fisicoquímica del agua sintética

Parámetros	Unidad	Limite permisible	Muestra inicial	Muestra final CCM5	Muestra final CCM6	Muestra final CM7	Muestra final CCM8
pH	-	5-9	8,79	7,95	8,84	8,44	8,88
Conductividad	mS	-	2,416	2,860	2,418	2,712	2,516
Sólidos	ppt	1600	1,409	1,667	1,811	1,692	1,469
Totales							
Nitritos	mg/L	10	307,2	100,5	75	68	60
Nitratos	mg/L	10	950	390	340	290	240
Fosfatos	mg/L	-	1,27	192	103	90	21

Fuente: Autor

4.1.2 Potencial de generación de bioelectricidad del sistema de CCM de doble cámara

Figura 9. Voltaje generado por las CCM de doble cámara.



Fuente: Autor

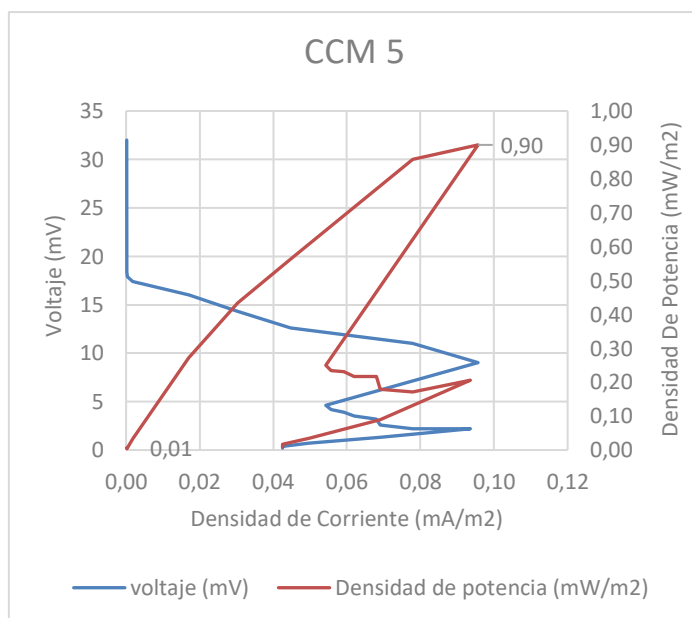
En la figura 9 se observó el comportamiento de las CCM de doble cámara para la producción de voltaje, generado en las cuatro CCM, como se puede identificar la celda CCM8 alcanzó un mejor rendimiento en cuanto a la producción de voltaje durante el periodo de estudio de esta investigación en comparación con las CCM5, CCM6 y CCM7. Se mostró que la CCM8 registro un pico máximo de voltaje de 215 mV en el día 12, mientras que el pico mínimo alcanzado de voltaje fue 147mV en el día 23, determinando su capacidad estable para la producción de energía eléctrica. Por otro parte, la CCM7 tuvo un comportamiento similar a la CCM8, alcanzando un pico máximo en el día 9 de 188mV, sin embargo, su rendimiento fue disminuyendo, alcanzando un pico mínimo de 98mV en el día 23. Con la CCM6 se presentó un pico máximo de voltaje de 167 mV en el día 7, pero experimento una caída notable después del día 7, con un voltaje mínimo de 12mV registrado en día 23, lo que podría indicar un agotamiento de los nutrientes disponibles o una disminución en la actividad microbiana dentro de la cámara anódica. Por otra parte, la CCM5, se evidencio los niveles de voltaje más bajos en relación con las otras CCM, observando en el día 3 el punto más alto

de generación de voltaje llegando a 79mV, sin embargo, el rendimiento fue mucho más estable y en el día 16 su voltaje decayó por completo a 0 mV.

4.1.3 Medidas electroquímicas

Como se observa en la figura 10 la cual representa la curva de polarización de CCM5 con una densidad de potencia máxima de 0,90 mW/cm², con una resistencia de 1000 Ω y la densidad de corriente máximo registrado de 0,10 mA/m² con la resistencia de 1000Ω con un área de 0,094m².

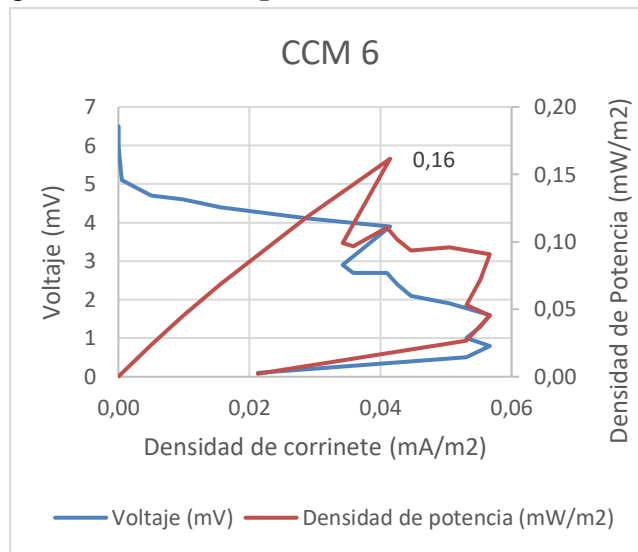
Figura 10. Curva de polarización CCM5.



Fuente: Autor

En la figura 11 representa la curva de polarización de la CCM6, la cual tiene una densidad de potencia máxima de 0,16 mW/cm² con una resistencia de 1000 Ω y la densidad de corriente máximo registrado fue de 0,05 mA/m² con la resistencia de 1000 Ω con un área de 0,094m².

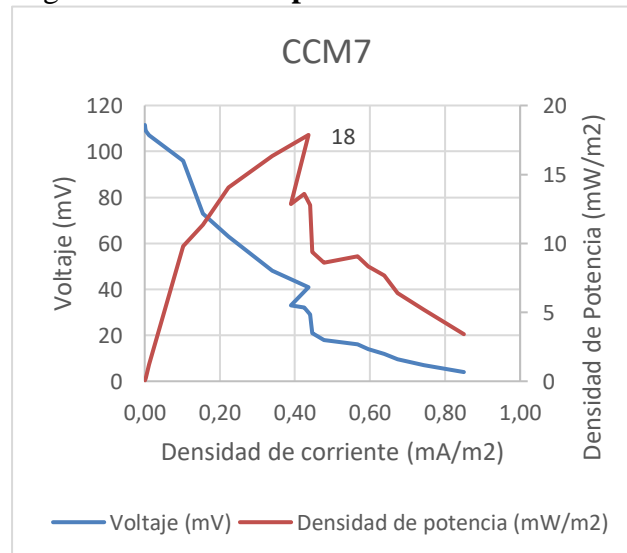
Figura 11. Curva de polarización CCM6



Fuente: autor

Como se puede observar en la figura 12 representa la curva de polarización de CCM7 la cual tiene con una densidad de potencia máxima de 8 mW/m^2 con una resistencia de 1000Ω y la densidad de corriente registrado fue de $0,85 \text{ mA/m}^2$ con la resistencia de 250Ω en un área de $0,094 \text{ m}^2$.

Figura 12. Curva de polarización CCM7

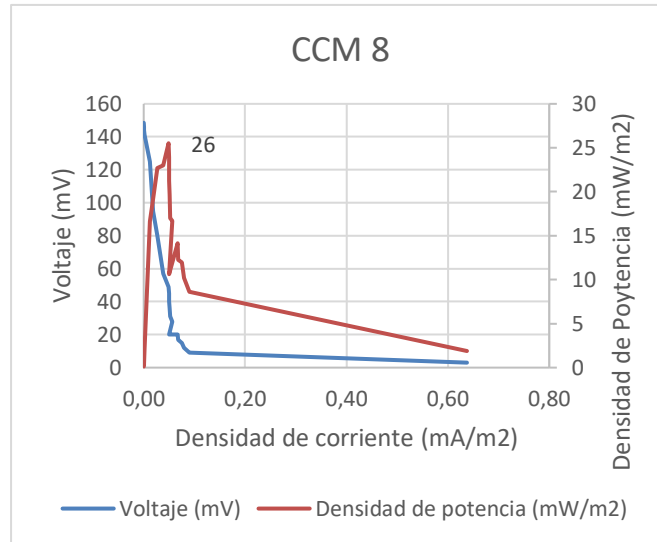


Fuente: Autor

En la figura 13 se puede observar la curva de polarización de CCM8 la cual registra una densidad de potencia máxima de 26 mW/m^2 con una resistencia de 1000Ω y la densidad de

corriente máximo registrado fue de $0,65 \text{ mA/m}^2$ con la resistencia de 1000Ω en un área de $0,094 \text{ m}^2$.

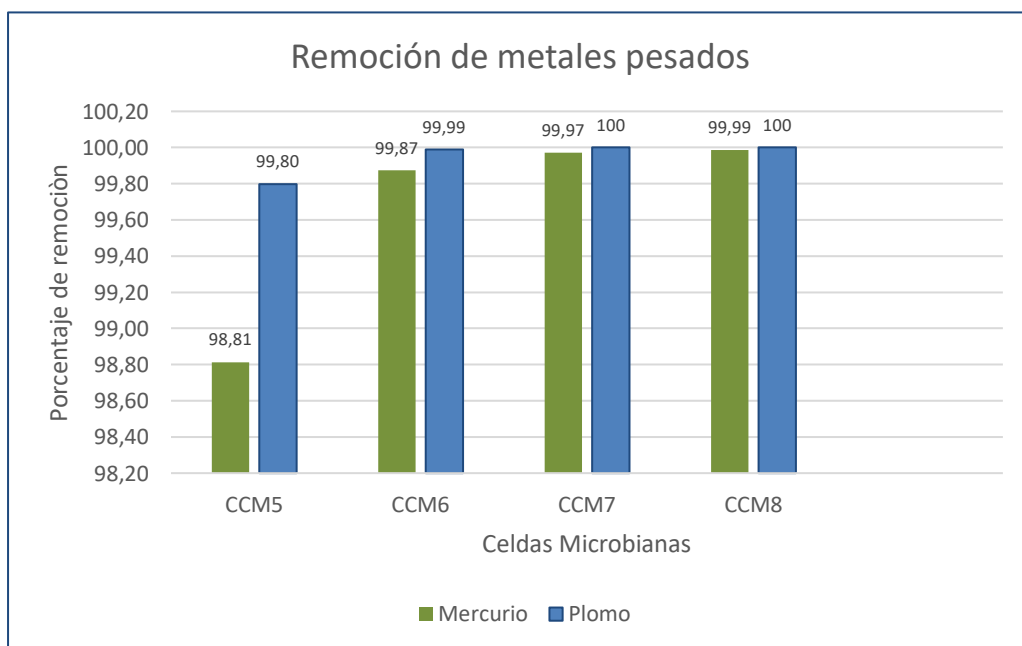
Figura 13. Curva de polarización CCM8



Fuente: Autor

4.1.4 Eficiencia del sistema de CCM para el tratamiento simultaneo del agua residual minera y sintética.

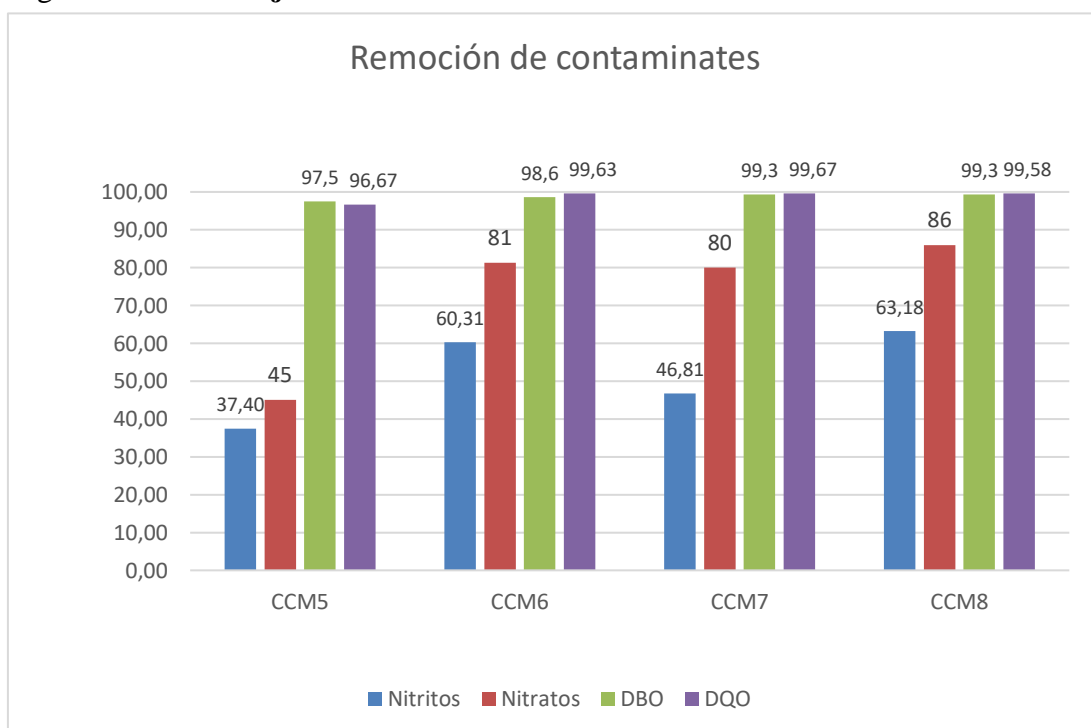
Figura 14. Porcentaje de remoción de metales



Fuente: Autor

Como se observa en la tabla 2, el agua residual minera supera los límites permitidos por la legislación ambiental ecuatoriana tanto para el Hg y Pb, No obstante, tras el tratamiento del agua mediante la utilización de las CCM de doble cámara, con *M inermum*, se consiguió una remoción notable de estos metales pesados. Los resultados presentes en la Figura 14 muestran que, en el caso del Hg, la celda de control CCM5 logro una eliminación del 98,81%. Comparando, con respecto a las celdas CCM6, CCM7 y CCM8, mostraron porcentajes de remoción aún más elevados, alcanzando el 99,87%, 99,97% y 99,99% respectivamente demostraron una eficiencia en la remoción de Hg. En cuanto a la remoción del Pb, en la CCM5 se logró una remoción 99,80%, en cambio en las celdas CCM6, CCM7 y CCM8 se consiguieron remociones considerables de 99,99%, 100% y 100 %, respectivamente. Estos datos muestran que las CCM de doble cámara no solo son efectivas en la remoción de Hg y Pb, sino que las celdas CCM7 y CCM8 lograron una eliminación completa del Pb en las muestras de agua..

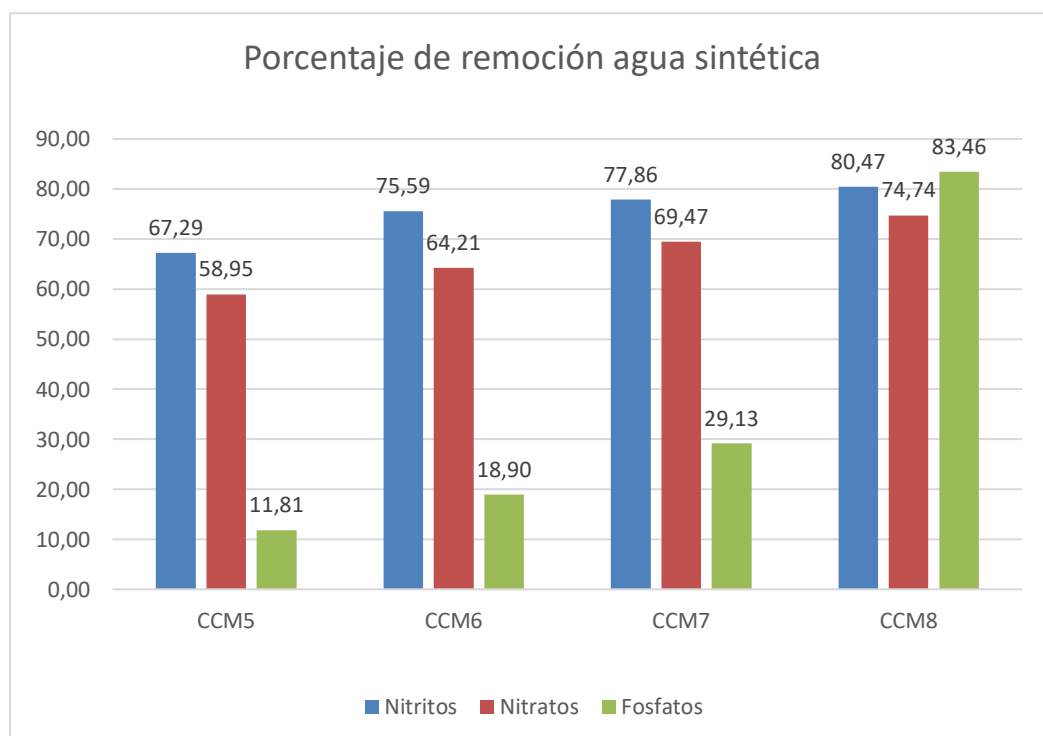
Figura 15. Porcentaje de remoción de contaminantes



Fuente: Autor

En la Figura 15, representa los resultados de remoción de los contaminantes en los cuatro tipos CCM de doble cámara CCM5, CCM6, CCM7 y CCM8, las cuales son analizadas en función de su capacidad para eliminar (NO_2^-), (NO_3^-), (DBO) y (DQO), una vez aplicado el tratamiento. En la CCM5 la remoción de DBO fue de 97,5 % y de la DQO fue de 96,67%, aunque mostró una menor eficiencia en la eliminación de compuestos nitrogenados, con 37,4% para (NO_2^-) y 45% para (NO_3^-), indicando una menor eficiencia en comparación con DBO5 y DQO, en la CCM6 y CCM7 destacaron en la remoción de DQO, alcanzando un 99,63% y 99,67%, en DBO5 alcanzando un 98,6% y 99,3% lo que indica su alta capacidad para reducir la materia orgánica biodegradable. Por otro lado, CCM8 sobresalió en la remoción de (NO_2^-) con 63,18% y (NO_3^-) con 86%, en comparación con CCM5, CCM6, CCM7 y demostró un desempeño equilibrado en todos los contaminantes, lo que la posición como la celda más eficiente en la reducción tanto de compuestos orgánicos como nitrogenados.

Figura 16. Porcentaje de remoción de contaminantes del agua sintética



Fuente: Autor

Como se muestra en la figura 16, se evaluó la eficiencia para la remoción de (NO_2^-), (NO_3^-) y (PO_4^{3-}) en agua sintética utilizando cuatro CCM (CCM5, CCM6, CCM7 y CCM8). Los resultados indican diferencias notables en el desempeño de cada celda la CCM5 mostró una remoción del 67,29% para (NO_2^-), 58,95% para (NO_3^-) y 11,81% para (PO_4^{3-}), en la CCM6 y CCM7, los resultados variaron con 75,59% y 77,86 para (NO_2^-) 64,21% y 69,47% para (NO_3^-), en la CCM6 28,90 % y CM7 29,13% para (PO_4^{3-}) respectivamente. La CCM8 sobresalió en la remoción de (PO_4^{3-}) con, 83,46%. (NO_2^-) con 80,47%, y (NO_3^-) con 74,74%.

4.2 Discusión de los Resultados

Los resultados obtenidos en esta investigación descartan la eficiencia de la CCM de doble cámara con *M inermum* como un biocatalizador en la remoción de metales pesados y otros contaminantes, además de la generación de voltaje. Para la remoción de Hg y Pb, los resultados son significativos, alcanzando eficiencias de hasta un 99,99% para Hg y un 100% en Pb en las CCM. Estos resultados resaltan la capacidad de las CCM para remover metales pesados presentes en aguas residuales, respaldando estudios previos que evidencian la efectividad de estos sistemas en procesos de bioadsorción y bioprecipitación (Kumar et al., 2020). Además, su alto nivel de eliminación de Pb indica una bioadsorción bajo condiciones de pH, temperatura controlado, tal como se describe en estudios recientes (Sanchez et al., 2021).

El Hg y Pb en el agua residual minera exceden los límites máximos permitidos por la normativa ambiental de Ecuador, destacando así la necesidad de un tratamiento adecuado para la remediación de estos efluentes provenientes de la industria minera. Los resultados obtenidos mediante la implementación de CCM de doble cámara con *M. inermum* presentaron una opción viable y eficaz para el tratamiento de aguas residuales mineras superando el 99% en Hg y 100% de remoción de Pb. Estos resultados coinciden con lo

reportado por, (Kumar et al., 2020) quienes han subrayado la potencial aplicación de las CCM en la remoción de contaminantes de origen minero para iones metálicos.

Respecto a la remoción de materia orgánica y compuestos nitrogenados, las CCM de doble cámara demostraron eficiencias superiores al 99%, en la disminución de DBO y DQO, demostrando así su capacidad para remover compuestos orgánicos. Esta investigación coincide con el reportado por (J. Li et al., 2022), quienes destacan la capacidad de las CCM para reducir considerablemente la carga orgánica en aguas residuales, debido a la actividad electroquímica de los microorganismos presentes en el ánodo, permitiendo la degradación eficiente. Por otra parte, la celda CCM8 mostró mayor eficiencia en la remoción de (NO_2^-) con 63,18% y (NO_3^-) con un 86%, esto sugiere que existe una actividad de desnitrificación dentro de la CCM, en la cámara anódica. Estos resultados coinciden con investigaciones que destacan la capacidad de ciertos microorganismos presentes en las CCM para transformar compuestos nitrogenados en condiciones anóxicas, optimizando así la eliminación de estos contaminantes en aguas residuales (J. Li et al., 2022). La diferencia en la remoción de (NO_2^-) y (NO_3^-) entre CCM, podría estar relacionadas con la variación en la actividad microbiana o con variación de la temperatura, tal como lo indica (Tian et al., 2024), quienes demuestran en su estudio que a temperaturas entre 25° y 30° se observa una mayor eliminación de amonio (NH_4^+), (NO_2^-) y (NO_3^-), debido a que temperaturas elevadas aumenta la tasa metabólica de las microalgas mejorando así la eliminación de nutriente.

Los resultados obtenidos del tratamiento del agua sintética también mostraron remociones favorables, con las CCM consiguiendo reducciones significativas del 74,74% de (NO_2^-), el 80,47% (NO_3^-) y 83,46% de (PO_4^{3-}). Estos resultados evidencian la versatilidad de las CCM de doble cámara para tratar contaminantes orgánicos que provocan la eutrofización del agua, estos resultados ha sido corroborado por (Habibi et al., 2019) quienes muestran en su estudio que el crecimiento de las algas está relacionado con la

disminución de las concentraciones de (NO_2^-) , (NO_3^-) y (PO_4^{3-}) ya que la eliminación de estos nutrientes por las microalgas en aguas residuales provoca el aumento de la tasa de crecimiento. La elevada remoción de (NO_3^-) a alta intensidad de luz puede deberse a la mayor demanda de nitrógeno en las algas para reparar el daño inducido en los fotosistemas causado por la alta intensidad de luz (Rani & Maróti, 2023).

Los resultados obtenidos en el estudio de las CCM de doble cámara demuestran un comportamiento diferencial en la producción de voltaje, lo cual refleja la capacidad de cada celda para generar bioelectricidad. En la Figura 9, se observa que la celda CCM8 destaca como la de mejor rendimiento, alcanzando un pico máximo de voltaje de 215 mV, y manteniendo una producción considerable, con un mínimo de 147 mV. Este rendimiento superior podría estar vinculado a una mayor densidad de biomasa y actividad microbiana en el ánodo, tal como lo sugieren estudios previos que señalan una correlación entre la densidad de biomasa y la capacidad de generación de voltaje en CCM (Mahmoud et al., 2022).

La baja producción de voltaje observada en la CCM6 podrían estar relacionado con una intensidad de luz excesiva, lo que podría haber provocado una foto inhibición en las microalgas, un problema común en sistemas que emplean microorganismos fotosintéticos, Por lo tanto, la foto inhibición podría estar afectando la estructura celular, afectando así la producción de voltaje. observados en CCM6 y CCM7, especialmente si el diseño experimental no incluyó un control preciso de la intensidad lumínica tal como lo indica el estudio de (Rani & Maróti, 2023). Este tipo de estrés oxidativo inhibe la capacidad de las microalgas para mantener un flujo constante de electrones, limitando así la producción de voltaje en las CCM (Rani & Maróti, 2023).

Capítulo 5

Conclusiones

Las CCM de doble cámara con *M inermum* mostraron ser altamente eficientes en la remoción de metales pesados, particularmente Hg y Pb, superando el 98% de eliminación en la mayoría de las CCM. Las celdas CCM6, CCM7 y CCM8 lograron remociones superiores al 99%, e incluso alcanzaron el 100% en el caso de Pb, lo cual resalta su viabilidad para el tratamiento de aguas residuales contaminadas con estos metales pesados.

El sistema de CCM también mostró un notable potencial para la generación de bioelectricidad. La CCM8 alcanzó el mayor rendimiento con un voltaje máximo de 215 mV, la CCM7 con 188 mV y la CCM6 con 167 mV, demostrando una estabilidad y capacidad significativas para la generación de energía. Estos resultados sugieren que la tecnología puede ser utilizada no solo para la remoción de contaminantes, sino también para la producción de energía sostenible.

Las CCM de doble cámara fueron efectivas en la reducción de DBO5 y DQO, de las aguas residuales mineras, lograron remociones superiores al 98%. Además, la celda CCM8 mostró una eficiencia particularmente alta en la remoción de compuestos nitrogenados, eliminando hasta un 63,18% de (NO_2^-) y 86% de (NO_3^-), lo que sugiere su potencial en la mejora de la calidad del agua en cuanto a contaminantes orgánicos y nitrogenados.

La mayor eficiencia en el tratamiento de agua residual sintética, con una remoción de y (PO_4^{3-}) del 83.46%, (NO_2^-), del 74.74% y 80,47% de (NO_3^-), mientras que las otras celdas tuvieron un rendimiento menos uniforme en la eliminación de estos compuestos, esto puede estar relacionado con una mayor densidad de biomasa presente en las celdas y una mayor intensidad de la luz.

Recomendaciones

Se recomienda Implementar mejoras en el diseño y configuración de las CCM de doble cámara para maximizar la generación de bioelectricidad y la eficiencia en la remoción de contaminantes, evaluando diferentes materiales, tamaños de electrodos y membranas MIP.

Como las bacterias juegan un papel importante en esta tecnología de producción de energía, se recomienda evaluar estas CCM con más consorcios de bacterias, para mejorar su rendimiento.

Utilizar una tarjeta de adquisición de datos o el potencióstato, para evaluar minuciosamente el comportamiento de las CCM a través de las curvas de polarización, en tiempo real; ya que al realizarlas con pocas resistencias y cerrar el circuito se observó una caída brusca de potencial para este modelo de CCM.

Referencias Bibliográficas

- Ccora, B., Alvarez, A., & Toribio, F. (2020). Generating of electricity and municipal wastewater treatment using microbial fuel cells (MFC) in the city of Huancavelica. *South Sustainability, 1*, e018. <https://doi.org/10.21142/ss-0102-2020-018>
- Chen, F., Zeng, S., Luo, Z., Ma, J., Zhu, Q., & Zhang, S. (2020). A novel MBBR–MFC integrated system for high-strength pulp/paper wastewater treatment and bioelectricity generation. *Separation Science and Technology (Philadelphia), 55*(14), 2490–2499. <https://doi.org/10.1080/01496395.2019.1641519>
- Christopher, A., Howard, A., Ward, C., & Wanger, G. (2020). Sediment microbial fuel cells as a barrier to sulfide accumulation and their potential for sediment remediation beneath aquaculture pens. *Scientific Reports, 10*(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70002-4>
- Cuadrado, J., Rodriguez, G., & Recalde, C. (2022). *Generación De Bioelectricidad Mediante Celdas De Combustible Microbianas Usando Aguas Residuales De Minería Aurífera Con Pleurococcus Sp Como Biocatalizador En La Cámara Catódica.*
- Doan, C., Sansonnens, J., Morgante, M., Savy, C., Martinet, D., Huguenin, G., Maye, S., Salvo, M. V., & Fischer, F. (2023). LED algal microbial fuel cell stack balancing conception: Electronic voltage reversal blockage, light feed-starvation cycling, and aeration. *Sustainable Energy Technologies and Assessments, 60*(September). <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103464>
- Ezziat, L., Elabed, A., Ibsouda, S., & El Abed, S. (2019). Challenges of microbial fuel cell architecture on heavy metal recovery and removal from wastewater. *Frontiers in Energy Research, 7*(January), 1–13. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2019.00001>
- Fan, Y., Sharbrough, E., & Liu, H. (2018). Quantification of the internal resistance

- distribution of microbial fuel cells. *Environmental Science and Technology*, 42(21), 8101–8107. <https://doi.org/10.1021/es801229j>
- García, N., Guamán, M., & Paola, G. (2019). Efficient bioremediation from metallurgical effluents through the use of microalgae isolated from the amazonic and highlands of Ecuador. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 35(4), 917–929. <https://doi.org/10.20937/RICA.2019.35.04.11>
- Habibi, A., Nematzadeh, G. A., shariati, F. P., Amrei, H. D., & Teymouri, A. (2019). Effect of light/dark cycle on nitrate and phosphate removal from synthetic wastewater based on BG11 medium by *Scenedesmus* sp. 3 *Biotech*, 9(4), 1–9. <https://doi.org/10.1007/s13205-019-1679-7>
- INEN. (2013). Agua. Calidad Del Agua. Muestreo. Manejo Y Conservación De Muestras. *Norma Tecnica Ecuatoriana*, 26. [https://www.insistec.ec/images/insistec/02-cliente/07-descargas/NTE INEN 2169 - AGUA. CALIDAD DEL AGUA. MUESTREO. MANEJO Y CONSERVACIÓN DE MUESTRAS.pdf](https://www.insistec.ec/images/insistec/02-cliente/07-descargas/NTE_INEN_2169_-_AGUA._CALIDAD_DEL_AGUA._MUESTREO._MANEJO_Y_CONSERVACION_DE_MUESTRAS.pdf)
- Kumar, M., Singh, A. K., & Sikandar, M. (2020). Biosorption of Hg (II) from aqueous solution using algal biomass: kinetics and isotherm studies. *Heliyon*, 6(1), e03321. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03321>
- Li, J., Zhou, J., Cao, W., Zhang, M., Wei, X., Zhao, W., Zhao, J., & Wu, Y. (2022). *Optimization of Ammonia Nitrogen and Phosphorus Removal Performance and Analysis of Microbial Community Structure*.
- Li, M., Zhou, M., Luo, J., Tan, C., Tian, X., Su, P., & Gu, T. (2019). Carbon dioxide sequestration accompanied by bioenergy generation using a bubbling-type photosynthetic algae microbial fuel cell. *Bioresource Technology*, 280(February), 95–103. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.02.038>

- Lu, X., von Haxthausen, K. A., Brock, A. L., & Trapp, S. (2021). Turnover of lake sediments treated with sediment microbial fuel cells: a long-term study in a eutrophic lake. *Science of the Total Environment*, 796, 148880. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148880>
- Lumba, N., & Porras, L. (2020). *Generación de bioelectricidad a partir de agua residual doméstica por el método celdas de combustible microbiano (CCM): Una Revisión Trabajo. Ccm*, 1–94.
- Mahmoud, R. H., Samhan, F. A., Ibrahim, M. K., Ali, G. H., & Hassan, R. Y. A. (2022). Waste to energy conversion utilizing nanostructured Algal-based microbial fuel cells. *Electrochemical Science Advances*, 2(6), 1–7. <https://doi.org/10.1002/elsa.202100071>
- Martínez, E., Baeza, J., & González, R. (2019). Modelo Bioelectroquímico del Cátodo de una Celda de Combustible Microbiana. *RECERCAT (Dipòsit de La Recerca de Catalunya)*. <https://recercat.cat/handle/2072/351527>
- Mestanza-Ramón, C., Cuenca-Cumbicus, J., D'orio, G., Flores-Toala, J., Segovia-Cáceres, S., Bonilla-Bonilla, A., & Straface, S. (2022). Gold Mining in the Amazon Region of Ecuador: History and a Review of Its Socio-Environmental Impacts. *Land*, 11(2), 1–22. <https://doi.org/10.3390/land11020221>
- Michellin Kiruba N, J., Zielinski, J., Winiarski, J., Galanty, A., Dobrowolska-Iwanek, J., Fotopoulos, V., & Saeid, A. (2024). Enhanced recovery of waste-born nutrients from sewage sludge ash and fish meal through fungal treatment: Mechanistic insights and impact of heavy metals. *Bioresource Technology*, 413(September), 131389. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.131389>
- Mirquez, L., Lopes, F., Taidi, B., & Pareau, D. (2021). Nitrogen and phosphate removal from wastewater with a mixed microalgae and bacteria culture. *Biotechnology Reports*,

11, 18–26. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2016.04.003>

Munoz, C., Hu, Y., Xu, C., & Bassi, A. (2020). An Overview of Microbial Fuel Cell Usage in Wastewater Treatment, Resource Recovery and Energy Production. *Science of the Total Environment*, 142429. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142429>

Obileke, K. C., Onyeaka, H., Meyer, E. L., & Nwokolo, N. (2021). Microbial fuel cells, a renewable energy technology for bio-electricity generation: A mini-review. *Electrochemistry Communications*, 125, 107003. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2021.107003>

Osorio, M., Ibañez, W., Harlyn, R., Villa, D., & Mendoza, B. (2020). *Biorremediación de efluentes de la industria minera contaminados con cianuro* Biorremediation of effluents of the mining industry contaminated with cyanide *Biorremediação de efluentes da indústria de mineração contaminados com cianeto*. 5(03), 181–191. <https://doi.org/10.23857/pc.v5i3.1330>

Qi, J., Sun, Z., Zhang, J., & Ye, C. (2022). The Application of Sediment Microbial Fuel Cells in Aquacultural Sediment Remediation. *Water (Switzerland)*, 14(17). <https://doi.org/10.3390/w14172668>

Rani, V., & Maróti, G. (2023). Light-Dependent Nitrate Removal Capacity of Green Microalgae. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(1). <https://doi.org/10.3390/ijms24010077>

Rojas, S., Benites, S., Noriega, M. ., Cabanillas, C., Otiniano, N. M., Rodriguez, M., Valdiviezo, F., & Villacorta, W. (2021). Generation Bioelectricity from wastewater using low-cost microbial fuel cells. *Proceedings of the LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology, 2021-July*, 1–6. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2021.1.1.129>

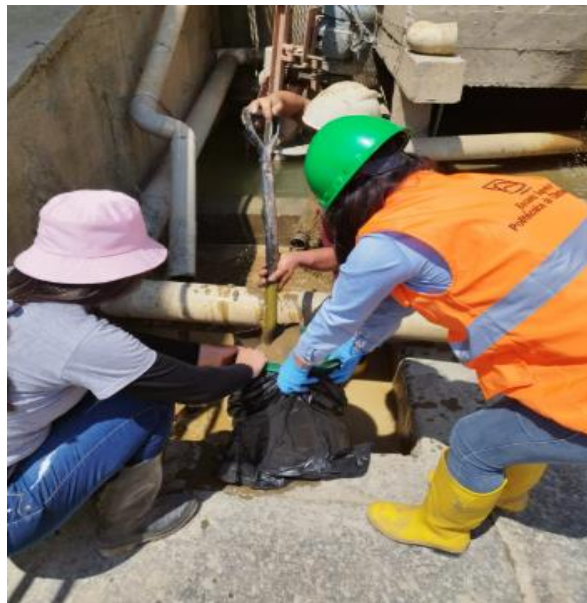
- Sanchez, M., Fernandez, L., & Espinoza, P. (2021). Generación de energía eléctrica y tratamiento de aguas residuales mediante celdas de combustible microbianas. *Novasinerгия Revista Digital De Ciencia, Ingeniería Y Tecnología*, 4(1), 164–180. <https://doi.org/10.37135/ns.01.07.10>
- Tian, X., Lin, X., Xie, Q., Liu, J., & Luo, L. (2024). *Effects of Temperature and Light on Microalgal Growth and Nutrient Removal in Turtle Aquaculture Wastewater*.
- Yang, X., & Chen, S. (2021). Microorganisms in sediment microbial fuel cells: Ecological niche, microbial response, and environmental function. *Science of the Total Environment*, 756(xxxx), 144145. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144145>
- Zhang, H., Yan, Q., An, Z., & Wen, Z. (2022). A revolving algae biofilm based photosynthetic microbial fuel cell for simultaneous energy recovery, pollutants removal, and algae production. *Frontiers in Microbiology*, 13(October), 1–14. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.990807>
- Zhang, Y., Liu, M., Zhou, M., Yang, H., Liang, L., & Gu, T. (2019). Microbial fuel cell hybrid systems for wastewater treatment and bioenergy production: Synergistic effects, mechanisms and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 103(July 2018), 13–29. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.027>
- Zieliński, M., Rusanowska, P., Dudek, M., Starowicz, A., Barczak, Ł., & Dębowski, M. (2024). Efficiency of Photosynthetic Microbial Fuel Cells (pMFC) Depending on the Type of Microorganisms Inhabiting the Cathode Chamber. *Energies*, 17(10). <https://doi.org/10.3390/en17102296>

Anexos

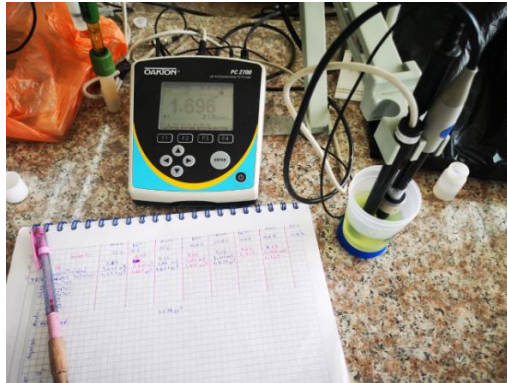
Anexo 1. Muestreo del agua residual minera



Piscinas de sedimentación



Recolección de la muestra de agua

Anexo 2 Análisis fisicoquímico del agua residual minera

Medición de pH, T, Conductividad



Determinación de Nitritos, Nitratos y Fosfatos



Determinación de DBO y DQO



Anexo 3. Preparación del medio BG11 y armado de las CCM de doble cámara

Solución 1 y 2

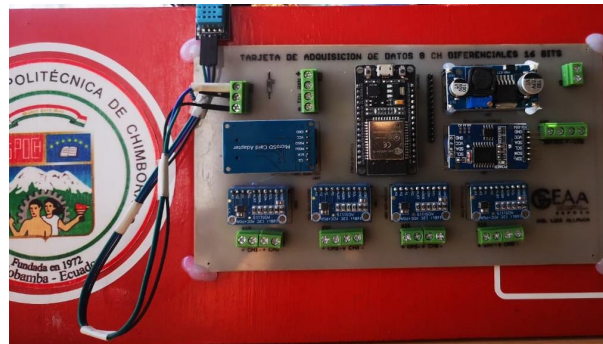
BG11 con *M inermum*

Armado de la CCM de doble cámara

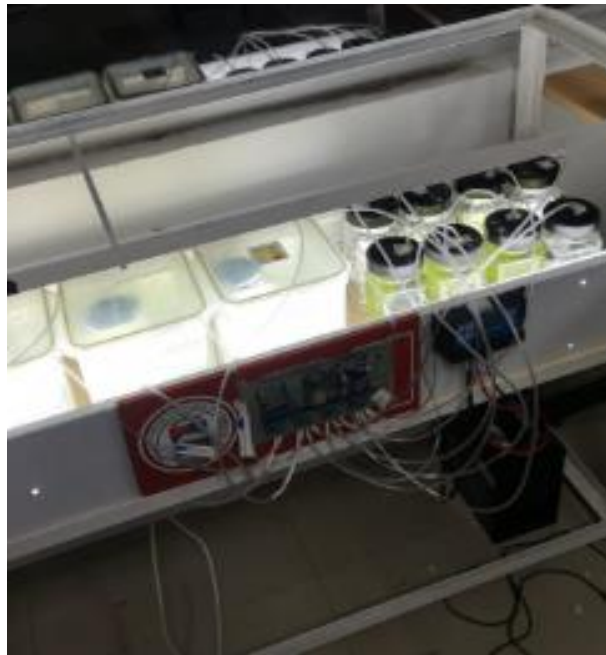


CCM de doble cámara

Anexo 4. Monitoreo de las CCM



Tarjeta de adquisición de datos



Monitoreo de las 4CCM



Monitoreo del voltaje durante 23 días

Anexo 5. Análisis de resultados de metales pesados

BMTLAB				
INFORME DE ENSAYOS PLE-1033-24 ANALISIS DE CALIDAD DE AGUAS				
IDENTIFICACIÓN DEL CLIENTE				
Nombre:	Escuela Superior Politécnica de Chimborazo - Joana Fernanda Iza Guaman			
Dirección:	Avenida Monseños Leonidas Proaño			
Correo Electrónico:	joana.iza@epoch.edu.ec			
Teléfono:	09876764515 Riobamba, 02 de Octubre de 2024			
IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA				
Origen de Muestra:	Agua Residual Minera - Zaruma Número de Muestras: 1			
Punto de Muestra:	Portovelo Técnico Responsable: Ing. Juan José Oleas			
Coordenadas:	CH5 - ACID Fecha y Hora de Recepción de la Muestra: 23/09/24 16:00:00			
Tipo de Muestreo:	N/A Fecha y Hora de Muestreo: N/A			
Código de la Muestra:	MA - 062-24 Condiciones Ambientales del Análisis: 23,5 °C ; 57,7 %HR			
Norma Técnica de Muestreo:	N/A Condiciones Ambientales del Muestreo: N/A			
RESULTADOS				
METALES				
PARÁMETROS	RESULTADOS	UNIDADES	U(N=2)	MÉTODO/ PROCEDIMIENTO
MERCURIO	0,26	µg/L	---	EPA 7470 A SM 3112 B/PE- BMTLAB-69
PLOMO	0,00	µg/L	---	SM 3113 B/ BMTLAB-69

Autorizado y firmado electrónicamente por:



Activar
Ve a Con

BMTLAB				
INFORME DE ENSAYOS PLE-1032-24 ANALISIS DE CALIDAD DE AGUAS				
IDENTIFICACIÓN DEL CLIENTE				
Nombre:	Escuela Superior Politécnica de Chimborazo - Joana Fernanda Iza Guaman			
Dirección:	Avenida Monseños Leonidas Proaño			
Correo Electrónico:	joana.iza@epoch.edu.ec			
Teléfono:	09876764515 Riobamba, 02 de Octubre de 2024			
IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA				
Origen de Muestra:	Agua Residual Minera - Zaruma Número de Muestras: 1			
Punto de Muestra:	Portovelo Técnico Responsable: Ing. Juan José Oleas			
Coordenadas:	CH4 - ACID Fecha y Hora de Recepción de la Muestra: 23/09/24 16:00:00			
Tipo de Muestreo:	N/A Fecha y Hora de Muestreo: N/A			
Código de la Muestra:	MA - 061-24 Condiciones Ambientales del Análisis: 23,5 °C ; 57,7 %HR			
Norma Técnica de Muestreo:	N/A Condiciones Ambientales del Muestreo: N/A			
RESULTADOS				
METALES				
PARÁMETROS	RESULTADOS	UNIDADES	U(N=2)	MÉTODO/ PROCEDIMIENTO
MERCURIO	0,33	µg/L	---	EPA 7470 A SM 3112 B/PE- BMTLAB-69
PLOMO	0,06	µg/L	---	SM 3113 B/ BMTLAB-69

Autorizado y firmado electrónicamente por:



Acti
Ve a

BMTLAB				
INFORME DE ENSAYOS				
PLE-1035-24				
ANÁLISIS DE CALIDAD DE AGUAS				
IDENTIFICACIÓN DEL CLIENTE				
Nombre:	Escuela Superior Politécnica de Chimborazo - Joana Fernanda Iza Guaman			
Dirección:	Avenida Monseños Leonidas Proaño			
Correo Electrónico:	joana.iza@epoch.edu.ec			
Teléfono:	09876764515 Riobamba, 02 de Octubre de 2024			
IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA				
Origen de Muestra:	Agua Residual Minera - Zaruma			
Punto de Muestra:	Portovelo			
Coordenadas:	CH7 - ACID			
Tipo de Muestreo:	Simple			
Código de la Muestra:	MA - 064-24			
Norma Técnica de Muestreo:	N/A			
Número de Muestras:	1			
Técnico Responsable:	Ing. Juan José Oleas			
Fecha y Hora de Recepción de la Muestra:	23/09/24 16:00:00			
Fecha y Hora de Muestreo:	N/A			
Condiciones Ambientales del Análisis:	23,5 °C ; 57,7 %HR			
Condiciones Ambientales del Muestreo:	N/A			
RESULTADOS				
METALES				
PARÁMETROS	RESULTADOS	UNIDADES	U(k=2)	MÉTODO/ PROCEDIMIENTO
MERCURIO	0,00	µg/L	----	EPA 7470 A SM 3112 B/PE- BMTLAB-68
PLOMO	0,00	µg/L	----	SM 3113 B/ BMTLAB-69

Autorizado y firmado electrónicamente por:

Act
Ve a

BMTLAB				
INFORME DE ENSAYOS				
PLE-1036-24				
ANÁLISIS DE CALIDAD DE AGUAS				
IDENTIFICACIÓN DEL CLIENTE				
Nombre:	Escuela Superior Politécnica de Chimborazo - Joana Fernanda Iza Guaman			
Dirección:	Avenida Monseños Leonidas Proaño			
Correo Electrónico:	joana.iza@epoch.edu.ec			
Teléfono:	09876764515 Riobamba, 02 de Octubre de 2024			
IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA				
Origen de Muestra:	Agua Residual Minera - Zaruma			
Punto de Muestra:	Portovelo			
Coordenadas:	CH8 - ACID			
Tipo de Muestreo:	Simple			
Código de la Muestra:	MA - 065-24			
Norma Técnica de Muestreo:	N/A			
Número de Muestras:	1			
Técnico Responsable:	Ing. Juan José Oleas			
Fecha y Hora de Recepción de la Muestra:	23/09/24 16:00:00			
Fecha y Hora de Muestreo:	N/A			
Condiciones Ambientales del Análisis:	23,5 °C ; 57,7 %HR			
Condiciones Ambientales del Muestreo:	N/A			
RESULTADOS				
METALES				
PARÁMETROS	RESULTADOS	UNIDADES	U(k=2)	MÉTODO/ PROCEDIMIENTO
MERCURIO	0,00	µg/L	----	EPA 7470 A SM 3112 B/PE- BMTLAB-68
PLOMO	0,00	µg/L	----	SM 3113 B/ BMTLAB-69

Autorizado y firmado electrónicamente por:

Activ
Ve a C