



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA INGENIERÍA EN BIOTECNOLOGÍA AMBIENTAL

**EVALUACIÓN DEL POTENCIAL ELECTROGÉNICO DE UNA
MEMBRANA DE INTERCAMBIO DE ELECTRONES PARA UNA
CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA EN EL
TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS.**

Trabajo De Titulación

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERA EN BIOTECNOLOGÍA AMBIENTAL

AUTORA: LADY ITZAYANA REVELO RODRÍGUEZ

Riobamba– Ecuador

2023



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA INGENIERÍA EN BIOTECNOLOGÍA AMBIENTAL

**EVALUACIÓN DEL POTENCIAL ELECTROGÉNICO DE UNA
MEMBRANA DE INTERCAMBIO DE ELECTRONES PARA UNA
CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA EN EL
TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS.**

Trabajo De Titulación

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERA EN BIOTECNOLOGÍA AMBIENTAL

AUTORA: LADY ITZAYANA REVELO RODRÍGUEZ

DIRECTORA: ING. CRISTINA GABRIELA CALDERÓN TAPIA MSc.

Riobamba– Ecuador

2023

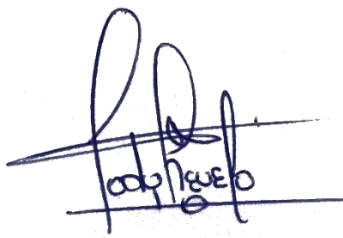
© 2023, Lady Itzayana Revelo Rodríguez

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, **LADY ITZAYANA REVELO RODRÍGUEZ**, declaro que el presente Trabajo de Titulación es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autora asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Titulación; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 15 de febrero de 2023


A handwritten signature in black ink, consisting of stylized, overlapping loops and lines. Below the signature, the name 'LADY REVELO' is written in a smaller, less stylized font.

Lady Itzayana Revelo Rodríguez

092295614-9

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA INGENIERÍA EN BIOTECNOLOGÍA AMBIENTAL

El tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El Trabajo de Titulación; tipo: Proyecto de Investigación: **“EVALUACIÓN DEL POTENCIAL ELECTROGÉNICO DE UNA MEMBRANA DE INTERCAMBIO DE ELECTRONES PARA UNA CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA EN EL TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS”**, de responsabilidad de la señorita: **LADY ITZAYANA REVELO RODRÍGUEZ**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos y legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Dr. Fausto Manolo Yaulema Garcés PRESIDENTE DEL TRIBUNAL	 _____	2023-02-15
Ing. Cristina Gabriela Calderón Tapia MSc. DIRECTORA DE TRABAJO DE TITULACIÓN	 _____	2023-02-15
Dra. Magdy Mileni Echeverría Guadalupe, PhD MIEMBRO DEL TRIBUNAL	 _____	2023-02-15

DEDICATORIA

El presente trabajo, se lo dedico en primer lugar a Dios por darme la fuerza y sabiduría para enfrentar todas las dificultades que se me han presentado en el transcurso del ciclo de formación profesional. Sin duda alguna, a mis amados padres; Luis Revelo y Carlina Rodríguez, porque sin su amor y apoyo incondicional, absolutamente ningún logro hubiera sido posible. A mis queridos hermanos Luigi y Christopher por sus demostraciones de afecto, a mi enamorado Alejandro Villacrés por no soltar mi mano durante todo este proceso e impulsarme a mejorar día a día, a mi tío Paulo Cesar Reyes por ser un pilar fundamental en la culminación de mi tesis, a mis tías y abuelitos por ser mi motivación en los momentos más difíciles. Gracias infinitamente a cada uno de ustedes porque con sus muestras de cariño y soporte, hoy los éxitos se vean reflejados a través de este trabajo de investigación.

Itzayana

AGRADECIMIENTOS

En primera instancia agradezco a mis formadores del Grupo de Investigación y Desarrollo para el Ambiente y Cambio Climático (GIDAC), en especial a la Ing. Cristina Calderón e Ing. Alex Guambo, por estar siempre predispuestos a asesorarme, apoyarme y por ser una pieza clave para que este trabajo se vea reflejado con éxito. De igual manera a la Ing. Dianita Campoverde por su ayuda y asesoramiento estadístico. Finalmente, agradezco a mis amigos más íntimos: Norlly Chuga y Cristian Murillo, por todo su apoyo incondicional y cariño durante este proceso de formación universitaria. Por su aportación y muestras de afecto les quedo eternamente agradecida.

Itzayana

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	x
ÍNDICE DE ANEXOS	xii
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT	xiv
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I.....	2
1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	2
1.1. Planteamiento del problema	2
1.2. Problema general de investigación	3
1.3. Problemas específicos de investigación.....	3
1.4. Objetivos.....	3
1.4.1. <i>Objetivo General</i>	3
1.4.2. <i>Objetivos Especificos</i>	4
1.5. Justificación	4
1.5.1. <i>Justificación metodológica</i>	4
1.5.2. <i>Justificación práctica</i>	4
CAPÍTULO II	6
2. MARCO TEORICO.....	6
2.1. Antecedentes de investigación.....	6
2.2. Bases teóricas	7
2.2.1. <i>Componentes de una MFC</i>	7
2.2.2. <i>Membranas para una MFC</i>	7
2.2.3. <i>Potencial Electrogénico</i>	9
2.2.4. <i>Sustratos</i>	9
2.2.5. <i>Inóculos</i>	10
2.3.1. <i>Celdas de Combustible Microbianas</i>	11
2.3.3. <i>Membranas para producir bioelectricidad.</i>	12
<i>Fuente: (Tito, 2018)</i>	13
2.3.4. <i>Lixiviados</i>	13
2.3.4.1. <i>Contaminación por lixiviados</i>	14

2.4.1.	<i>Constitución de la República del Ecuador:</i>	15
2.4.2.	<i>Leyes</i>	16
2.4.3.	<i>Normativas</i>	16
2.4.4.	<i>Reglamentos</i>	16
CAPÍTULO III		18
3.	MARCO METODOLÓGICO	18
3.2.	Enfoque de investigación.....	18
3.1.1	<i>Cuantitativa</i>	18
3.3.	Nivel de investigación	18
3.3.1.	<i>Explicativo</i>	18
3.4.	Diseño de investigación.....	18
3.4.1.	<i>Tipo experimental</i>	18
3.5.	Población, selección y cálculo del tamaño de la muestra	19
3.5.2.	<i>Tamaño de la muestra</i>	20
3.5.3.	<i>Cálculos</i>	21
3.5.	Métodos, técnicas e instrumentos de investigación	23
3.5.1.	<i>Diseño y construcción de las MFCs</i>	23
3.5.2.	<i>Tratamiento y obtención de membranas</i>	24
3.5.3.	<i>Monitoreo y seguimiento de la investigación</i>	28
3.5.3.1.	<i>Análisis de Lixiviado</i>	28
3.5.4.	<i>Operacionalización de las MFCs</i>	30
3.5.5.	<i>Materiales e instrumentos experimentales</i>	30
CAPITULO IV		33
4.	MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	33
4.1.	Monitoreo y seguimiento de la investigación.	33
4.1.1.	<i>Análisis de lixiviado.</i>	34
4.2.	Operacionalización de las MFCs	37
4.3.	Prueba de hipótesis	39
4.3.1.	<i>Hipótesis estadística global</i>	39
4.3.2.	<i>Análisis de normalidad</i>	39
4.3.3.	<i>Comparación de medias</i>	40
4.4.	Discusión	43
CONCLUSIONES		44
RECOMENDACIONES		45

BIBLIOGRAFÍA.....	46
ANEXOS.....	52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-3. Diseño Experimental.....	19
Tabla 2-3. Residuos sólidos recolectados	21
Tabla 3-3. Obtención de agua lluvia	22
Tabla 4-3. Obtención de lixiviado puro	22
Tabla 5-3. Recursos utilizados en el desarrollo de la investigación.....	31
Tabla 6-3. Resultado de nitrógeno amoniacal por proceso de oxidación orgánico.....	34
Tabla 7-3. Resultado de análisis inicial y final del DQO.....	35
Tabla 8-3. Resultado de análisis inicial y final del DBO5.....	35
Tabla 9-3. pH medido diariamente durante la experimentación.....	36
Tabla 10-3. Promedio de voltaje generado en milivoltios.....	37
Tabla 11-3. Prueba de normalidad	39
Tabla 12-3. Análisis de varianza con un factor ANOVA.....	40
Tabla 13-3. Análisis de varianza para comparar múltiples medias	41

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1-2. Celda de combustible con membrana de intercambio protónico.....	8
Ilustración 2-2: Principio de funcionamiento de MFC.....	11
Ilustración 3-2. Membrana a base de almidón.....	12
Ilustración 4-2. Estructura química de ionómero Nafión y del canal y clúster iónico de una membrana.	13
Ilustración 5-2. EP-EMMPA San Pedro de Riobamba.....	19
Ilustración 6-3. Recolección de residuos sólidos.....	20
Ilustración 7-3. Inoculación de la bacteria <i>Delftia Acidovorans</i>	23
Ilustración 8-3. Diseño de las MFCs.	24
Ilustración 9-3. Tratamiento de membranas A: Recorte de membranas. B: Lavado de membranas. C: Secado de membranas anódicas.....	25
Ilustración 10-3. Síntesis de maghemita. A: Mezcla de cloruro férrico y ferroso. B: Incorporación de nitrógeno a la muestra. C: Centrifugación.....	26
Ilustración 11-3. Armado de las MFCs.	27
Ilustración 12-3. A: Incorporación del estabilizador mineral y del agente dispersante de alcohol de polivinilo. B: Reactivo Nessler.	28
Ilustración 13-3. Análisis de DQO.	29
Ilustración 14-3. Análisis de DBO5.	29
Ilustración 15-3. Control de pH.....	30
Ilustración 16-4. Operacionalización de MFCs.....	33

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-4. Monitoreo del pH durante el tiempo de experimentación	36
Gráfico 2-4. Voltajes finales medidos en MFCs.	38
Gráfico 3-4. Diagrama de cajas de las MFCs.....	42

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: Aval de Investigación.....	52
ANEXO B: Análisis Físico-Químicos Iniciales	53
ANEXO C: Análisis Físico-Químicos Finales.....	54

RESUMEN

El presente proyecto de investigación tuvo como objetivo evaluar el potencial electrogénico de una membrana de intercambio de electrones para una celda de combustible microbiana en el tratamiento de lixiviados. Para la experimentación, se recolectó residuos sólidos de frutas y vegetales provenientes de múltiples naves ubicadas en el Mercado Mayorista: EP-EMMPA San Pedro de la ciudad de Riobamba. El ensamblaje de las MFCs, se llevó a cabo en el Laboratorio de Ciencias Biológicas de la Facultad de Recursos Naturales, donde se utilizó una cámara de flujo laminar para descontaminar a través de luz ultravioleta, cada uno de los compartimientos de la cámara anódica y catódica de las MFCs, evitando la presencia de microorganismos que pudiesen alterar la producción de bioelectricidad (asepsia). Para la experimentación, como inóculo se seleccionó la bacteria electrogénica *Delftia Acidovorans* que en conjunto con las membranas de intercambio protiónico: Fibra de carbono, maghemita y maghemita con tratamiento térmico incrementó el paso de electrones y producción de voltaje. El monitoreo de las MFCs se efectuó mediante un sistema de adquisición de datos con un Arduino 1 y 3 conversores analógicos ads1115 I2c recolectando automáticamente datos de voltaje cada 60 segundo en un ordenador durante 15 días. Se analizaron parámetros de demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, nitrógeno amoniacal y pH, obteniendo mejores resultados en la remoción de materia orgánica generada por acción bacteriana. Por otra parte, la producción de voltaje generada en las celdas MFC 3-2 y MFC 3-3 no presentaron diferencias significativas en comparación con la MFC 3-1 compuesta de fibra de carbono, donde se comprobó que los voltajes fueron inferiores con respecto a los tratamientos de maghemita y maghemita con tratamiento térmico. Es recomendable que el sustrato esté en contacto con la cámara anódica para una continua transmisión de H⁺ entre sustrato y membranas.

Palabras clave: <CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANAS (MFC)>, <BACTERIAS ELECTROGÉNICAS>, <MEMBRANAS DE INTERCAMBIO PROTIÓNICO>, <LIXIVIADOS>, <CULTIVOS AXÉNICOS>, <INÓCULO BACTERIANOS>

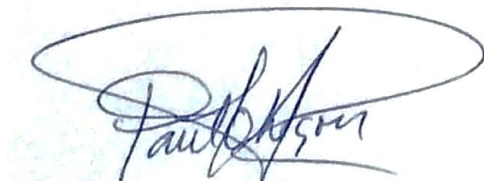
0503-DBRA-UPT-2023

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Rafael Briceño', is written over a circular blue stamp. The stamp contains text around its perimeter, including 'UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS' and 'FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS', and a central emblem.

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the electrogenic potential of an electron exchange membrane for a microbial fuel cell in leachate treatment. For the experimentation, solid waste from fruits and vegetables was collected from multiple warehouses located in the Wholesale Market: EP-EMMPA San Pedro in the city of Riobamba. The assembly of the MFCs was carried out in the Laboratory of Biological Sciences of the Faculty of Natural Resources, where a laminar flow chamber was used to decontaminate through ultraviolet light, each one of the compartments of the anodic and cathodic chamber. of the MFCs, avoiding the presence of microorganisms that could alter the production of bioelectricity (asepsis). For the experimentation, the electrogenic bacterium *Delftia Acidovorans* was selected as inoculum, which together with the protonic exchange membranes: Carbon fiber, maghemite and maghemite with heat treatment increased the passage of electrons and voltage production. The MFCs were monitored using a data acquisition system with an Arduino 1 and 3 ads1115 I2c analog converters, automatically collecting voltage data every 60 seconds on a computer for 15 days. Parameters of biochemical oxygen demand, chemical oxygen demand, ammoniacal nitrogen and pH were analyzed, obtaining better results in the removal of organic matter generated by bacterial action. On the other hand, the voltage production generated in the MFC 3-2 and MFC 3-3 cells did not present significant differences in comparison with the MFC 3-1 composed of carbon fiber, where it was found that the voltages were lower with respect to the treatments of maghemite and maghemite with thermal treatment. It is recommended that the substrate be in contact with the anode chamber for a continuous transmission of H⁺ between substrate and membranes.

Keywords: <MICROBIAL FUEL CELLS (MFCs)>, <ELECTROGENIC BACTERIA>, <PROTON EXCHANGE MEMBRANES>, <LEACHES>, <AXENIC CULTURES>, <BACTERIAL INOCULUM>

A handwritten signature in black ink, enclosed within a large, light blue oval. The signature appears to be 'Paulina' followed by a surname that is partially obscured and difficult to read.

INTRODUCCIÓN

En Ecuador, la demanda energética en el país se incrementó 14,3% durante el período de análisis, pasando de 72,7 millones BEP (BIM Execution Plan), en el año 2010 a 83,1 millones en 2020. Acorde con la tendencia histórica, el sector transporte es el mayor demandante de energía, con un valor promedio de 43 millones de BEP en los últimos diez años. Seguido por el sector industrial con un valor promedio de 14,7 millones de BEP en este mismo período. Finalmente, la tercera mayor demanda de energía del país proviene del sector residencial, con un promedio de 11,9 millones de BEP (Ministerio de Energía y Minas, 2022); por otra parte, la Agencia de Regulación y Control de Electricidad del Ecuador, determinó en el mismo año, que el 60.75% proviene de energía renovable, donde el 58.45% de energía es producida por hidroeléctricas, siendo esta última, una actividad cuestionable por la remoción de especies de flora y fauna, generación de emisiones gaseosas, metales pesados y material particulado, provocando degeneración ambiental del planeta (Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables, 2020).

De acuerdo al INEC, analizó que cada habitante del Ecuador produce en promedio alrededor de 0.84 kilogramos de residuos sólidos al día, en el área urbana, donde el 56.6% corresponde a residuos orgánicos, siendo otra problemática recurrente, debido a que los desperdicios de alimentos generados a partir de fábricas, restaurantes, comunidades y mercados, terminan en vertederos, donde se genera altos contenidos de lixiviados, sin ningún tratamiento que impida la percolación que contaminen suelos edáficos, aguas superficiales o subterráneas (INEC, 2019).

Los múltiples problemas causados por el uso de combustibles fósiles, y mala gestión de los residuos orgánicos, se ha visto en la necesidad de generar electricidad, a partir de nuevas tecnologías biológicas, como las celdas de combustible microbianas (MFCs), que son dispositivos que permiten biorremediar medios contaminados a través de bacterias electrogénicas. Las bacterias electrogénicas especialmente las del género *Delftia Acidovorans*, presentan la capacidad de generar electricidad a través de medios de cultivos selectivos y diferenciales, empleados para la formación de biopelícula en la cámara anódica de una MFC, ayudando a la producción de bioelectricidad (Rodríguez, 2018 p. 22)

Las MFCs, se han convertido en un área emergente y autosustentable para la generación alternativa de energía renovable, donde los residuos de alimentos tienen altas fracciones orgánicas, lo que les da un gran potencial para ser utilizado como una fuente alternativa de bioenergía disminuyendo simultáneamente la materia orgánica, ofreciendo oportunidades positivas para la biorremediación ambiental (Jatoi et al., 2020, p. 5009)

CAPÍTULO I

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Planteamiento del problema

La humanidad antiguamente consumía 410.10^{18} J de energía cada año, esto equivale a la energía que contiene 567869.25 L de petróleo, generando problemas fundamentalmente en la crisis energética y disponibilidad de recursos necesarios para el diario vivir (Nastar, 2020, p. 12). Estos problemas de energía generados a nivel mundial muestran la necesidad de promover el desarrollo de nuevas tecnologías para reutilizar residuos tanto de origen orgánico como inorgánico; con el fin de generar energía sustentable y renovable para el desarrollo favorable de un país.

La zona Andina del Ecuador se caracteriza particularmente por ser un ente en la investigación de inóculos como precursores de la producción de bioelectricidad mediante el aprovechamiento metabólico de ciertos sustratos como son los desperdicios de alimentos, específicamente de frutas y vegetales que, al ser generados en grandes cantidades, pueden generar problemas de impacto ambiental (Guambo et al., 2018, 08).

Una de las mayores problemáticas en la contaminación del ambiente son los lixiviados de residuos orgánicos, que al estar en contacto con aguas procedentes de lluvia, arrastra materiales disueltos o suspendidos que son altamente contaminantes, aumentando parámetros como DBO principalmente, los cuales requieren ser tratados mediante tecnologías alternativas que sean amigables con el ambiente, colaborando con una gestión de residuos más sana, convirtiéndose en una alternativa versátil y con menor impacto entre sus procesos de operación (Nastar, 2020, p. 13). Las celdas de combustible microbianas convierten energía química en energía eléctrica, transfiriendo electrones generados hacia el electrodo negativo (ánodo). Esta transferencia ocurre mediante un conductor, conocido como membrana de intercambio de electrones, el cual permite la oxidación del sustrato biodegradable en condiciones anaerobias para producir CO_2 , electrones y protones. Se conoce que varias investigaciones a escala de laboratorio utilizan Nafion y fibra de carbono como una opción de membrana, del cual se han obtenido resultados eficientes, aunque comercialmente no son rentables (Arenales, 2021 pág. 15).

1.2. Problema general de investigación

La crisis energética y la generación constante de residuos orgánicos e inorgánicos que se desechan en el diario vivir, son problemáticas que necesitan de soluciones emergentes, en donde residuos sean aprovechados a través de tratamientos que no afecten directamente al ecosistema; (diseminación de especies exóticas o disminución de especies nativas); sino que, por el contrario, los residuos sean una opción aplicable y beneficiosa para la producción de bioelectricidad, mediante tecnologías innovadoras como las MFCs (Arenales, 2021 pág. 18). Se conoce que los tratamientos de lixiviados realizados en MFCs, se realizan a través de procesos fisicoquímicos que tienen como limitante sus altos costos y el uso de reactivos químicos, especialmente de estabilización y de tratamiento de lodos generados, en el cual se implementa el proceso de coagulación- floculación, que convierte los lodos en residuos con mayor capacidad de biodegradabilidad. Los procesos de tratamiento de lixiviados, dependen de la concentración de contaminantes presentes, de la localización geográfica y del monitoreo de bioelectricidad en las MFCs, perfeccionando las actividades microbianas en la cámara anódica, al degradar un sustrato contenido de carbono, liberar electrones y oxidar la materia orgánica; generando electrones, protones y consecuentemente un decrecimiento de DQO y obtención de voltaje y corriente junto a una resistencia externa fija (Bejerano et al. 2020, p, 329).

1.3. Problemas específicos de investigación

- La falta de promoción de nuevas tecnologías para reutilizar residuos de origen orgánico como inorgánico.
- El déficit de energía sustentable y renovable para el desarrollo del país.
- Degradación del ambiente por la percolación de lixiviados de residuos orgánicos.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

- Evaluar el potencial electrogénico de una membrana de intercambio de electrones para una celda de combustible microbiana en el tratamiento de lixiviados.

1.4.2. *Objetivos Especificos*

- Construir celdas de combustible microbianas de cámara simple con membranas orientadas a un rendimiento de producción de bioelectricidad mejorada.
- Monitorear la cantidad de bioelectricidad producida por el ensamblaje de las membranas elaboradas.
- Analizar la distribución de energía de las membranas y el desempeño de la producción de bioelectricidad y remoción de carga orgánica contaminante.

1.5. *Justificación*

1.5.1. *Justificación metodológica*

La necesidad de crear nuevos procesos y tecnologías que permita a la sociedad, obtener energía útil a través de mecanismos más limpios e imprescindibles, que permita menoscabar costos de construcción y operación; por ello implementar una alternativa, por medio de la creación de dispositivos conocidos como celdas de combustible microbianas, permitirá crear una solución accesible para la sostenibilidad ambiental mediante la eliminación de contaminantes y la producción de energía más limpia (Plasencia, 2021, p. 92). Las celdas de combustible microbianas, constituyen hoy en día, un enfoque favorable y bastante prometedor para la generación de energía eléctrica a través de la implementación de una membrana electrolítica (fibra de carbono), que represente una maximización en la cantidad de voltaje de salida de una MFC, a partir de un requerimiento nutricional y contaminante, como son los lixiviados de origen orgánico (frutas y vegetales) (Guambo et al. 2018, p. 9). De modo, que la membrana de intercambio de electrones y las bacterias electrogénicas; tales como las del género *Deftia*, permitirá optimizar la cantidad de bioelectricidad mediante reacciones electroquímicas de óxido- reducción frente a dichos sustratos orgánicos altamente contaminantes (Bonilla del Pozo, 2018).

1.5.2. *Justificación práctica*

Los nuevos paradigmas de la economía circular requieren que se implementen nuevos enfoques tecnológicos para la recuperación de energía y recursos en lugar de las tecnologías tradicionales que consumen mucha energía (Duche, 2021). La tecnología (MFCs), se ha constituido como una nueva alternativa viable para el tratamiento de aguas residuales industriales, permitiendo la remoción de materia orgánica y generación de energía, siendo un proceso favorable de recuperación de energía (Bahamonde, et al. 2021). La viabilidad técnica de este concepto demostrada

en trabajos recientes; ha generado mayores expectativas en la comunidad científica para producir y contribuir con una energía más “verde” mediante la explotación y uso de biomasa.

La investigación cuenta con el respaldo y aval del Grupo de Investigación y Desarrollo para el Ambiente y Cambio Climático GIDAC-ESPOCH, representando un beneficio en aras del conocimiento científico, dentro del proyecto de investigación: “Opportunities and challenges of renewable energies as a territorial development in zones of the province of Chimborazo” que aporta en aspectos de viabilidad para producción de bioelectricidad.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEORICO

2.1. Antecedentes de investigación

Ecuador es conocido, por ser un país productor mediano de combustibles fósiles y al igual que varios países de América Latina, dependen de recursos no renovables como son el carbón, el petróleo y el gas natural como generadores principales de fuente de energía; por tal razón, en la actualidad, se ha buscado otras alternativas de producción de energía que sean menos costosas y mayormente beneficiosas con el ambiente disminuyendo la dependencia de los combustibles fósiles y energía nuclear (Guambo et al. 2018, p. 9). Estudios realizados en Celdas de Combustible Microbianas (MFCs), ha permitido la remoción de materia orgánica, biorremediación y la generación de energía eléctrica sostenible (Sánchez, et al. 2021, p. 168), a través de diferentes combinaciones de sustratos y configuraciones tanto en el ánodo como en el cátodo generando una diferencia de potencial de voltaje ($1,0 \text{ Vdc/cm}^2$) (Rosero, 2019, p. 19).

El primer concepto de celdas de combustible microbianas, fue demostrado por Potter en el año de 1910 (Vargas, 2018, p. 23). Para el año de 1973, S. Suzuki determinó un prototipo de MFC más avanzado con características similares a las configuraciones conocidas actualmente, en donde se utilizaban microorganismos para convertir la energía química presente en energía eléctrica, producidos en su actividad metabólica a un electrodo, en lugar de un aceptor natural de electrones (Sánchez et al. 2021 pág. 171). Mientras que, para fines de la década de los 70, se generó por primera vez un modelo computacional de celdas de combustible biológica (Bonetto, et al. 2018 p. 4).

El interés por las MFC, creció de manera significativa que a inicios de la década de los 80, se descubrió que la densidad de corriente y la potencia de salida mejoraría con la adición de membranas mediadoras de electrones, a partir de ello, las bases reguladoras del consorcio microbiano como catalizador anódico empezaron a ser investigadas en trabajos llevados a cabo con cultivos puros, mediadores para la transferencia de electrones entre bacterias y electrodos y fuentes de carbono no complejas (Bonetto, et al. 2018 p. 6). Durante los 90 la apetencia por mejorar la comprensión de estos sistemas hizo que en esta década se desarrollaran experimentos con distintas configuraciones de reactor y combinaciones de fuentes de carbono y las eficiencias coulombicas conseguidas permitieron incrementarse de manera relevante (Jiménez et al. 2018 p. 335).

Para el año 2014, la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), da inicio a los primeros estudios de bioelectricidad con celdas de combustible microbianas utilizando inicialmente residuos orgánicos como principal sustrato, con suelos de la Comunidad Achuar Kaipach-Amazonía y la Comunidad de Pichan Central-Andrés (Buñay y Sanunga, 2019 p. 54). Gracias a ello en posteriores Investigaciones se pudo analizar y determinar la influencia de la Demanda Bioquímica de Oxígeno de las Aguas Residuales para la generación de energía sustentable (Llontop, 2018 p. 34).

Hasta la actualidad, se conoce que investigadores continúan en el esfuerzo de generar una tecnología de MFC a partir de suelos de páramos como indicadores biológicos, siendo los páramos un lugar existente de bacterias electrogénicas generadoras principalmente de fuente de luz y degradadoras de materia orgánica (Argoti, 2019 p. 41).

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Componentes de una MFC

- **Compartimiento Anódico.-** La cámara anódica consiste en un cubo de acrílico donde se incorporan los microorganismos, responsables de formar una biopelícula microbiana; Aquí las células bacterianas en el ánodo del MFC consumirán el sustrato como combustible, generando bioelectricidad a medida que el sustrato se va descomponiendo (Guambo, 2021, p.21) posteriormente la materia orgánica contenida en dicho recipiente, se oxida liberando electrones hacia el cátodo y los protones producidos en la cámara anódica se difunde por medio de la membrana, de manera proporcional hacia la cámara catódica (Vargas, 2018 p. 23).
- **Compartimiento Catódico.** – La cámara catódica al estar expuesta al aire atmosférico representa un ambiente favorable para la producción de agua. Los electrones y protones producidos en la cámara anódica llegan al cátodo a través de un circuito externo que aumenta el potencial de dicho cátodo y al ser generados por la reacción en el ánodo se difunden desde el ánodo hasta el cátodo por medio de la membrana de intercambio protónico, estos al combinarse con el oxígeno, forman agua (Castillo, 2018, p. 181).

2.2.2. Membranas para una MFC

La incorporación de una membrana en una celda de combustible, es indispensable para el transporte de protones hacia el cátodo, esencial para la generación de bioelectricidad. (Figura 2-

2). Además, que permite el flujo de electrones a través de un circuito externo, que va direccionada desde la cámara anódica hacia la catódica en un solo sentido (Condori y Torres, 2019). Generalmente una MFC, se encuentra diferenciada por una membrana semipermeable, que permite mantener ambos compartimentos (anódico y catódico) separados (Tito, 2018), evitando que la biomasa y sales inorgánicas se vean comprometidos y pueda suscitar un deterioro en su funcionamiento por la acumulación sustancial de bacterias, dificultando el paso de protones hacia el ánodo, generando un declive en la eficiencia Coulombica y densidad de corriente, por lo que se vería obligado durante el proceso, la supresión definitiva de dicha membrana (Chinchín, 2020).

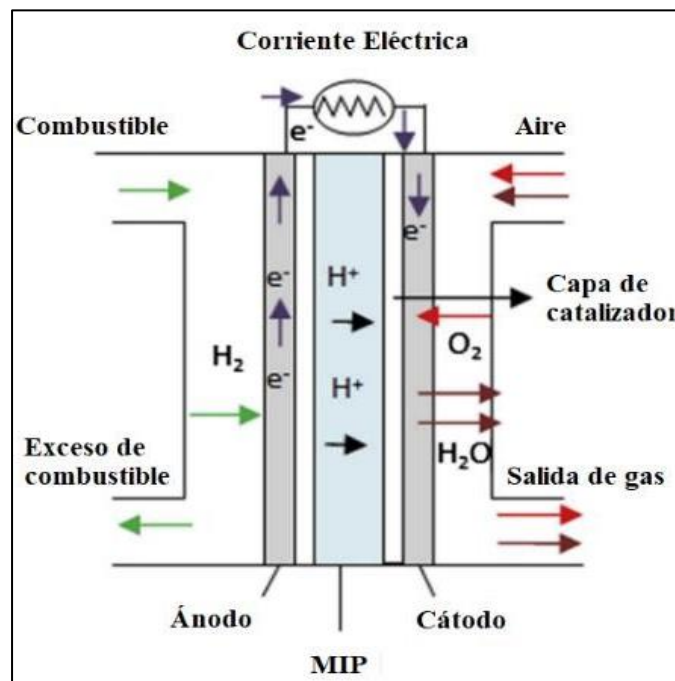


Ilustración 1-2. Celda de combustible con membrana de intercambio protónico.

Fuente: (Dharmalingam, 2019).

La presencia de membranas permite el flujo de electrones externos en una sola dirección desde el ánodo hacia el cátodo, dos zonas notoriamente diferenciadas; una cámara anódica y catódica con condiciones anaeróbicas y aeróbicas respectivamente (Hernández, 2018). Según, Chacón (2018), existe una gran variedad de membranas empleadas en la Sociedad de Biofísica de España, destacando las siguientes:

- **Membranas de Intercambio Iónico.** - Se emplea para la obtención de hidrógeno con un alto grado de pureza (Chacón, 2018), son membranas de separación de cationes y aniones y viceversa. Además, de ser utilizada especialmente en biotecnología para tratamientos de efluentes industriales y desalinización de agua salobre, sirven no solo para que el proceso

de tratamiento sea más puro o limpio sino para que este sea más eficiente energéticamente, tal es el caso de las membranas híbridas, que utilizan materiales tanto orgánicas como inorgánicas para potenciar sus propiedades térmicas, eléctricas y magnéticas a diferencia de utilizarlos de manera independiente ya que podrían ofrecer las mismas propiedades pero en menor intensidad (Weber, 2021).

- **Membrana de Intercambio catiónico (CEM).** - Posee grupos funcionales cargados negativamente que permiten la migración de cationes. Entre las membranas más conocidas se encuentran las de intercambio protónico (MIP), especialmente de Nafion 115 o 117 debido a su gran selectividad de protones. Otra alternativa es la membrana Ultrex CMI-7000 que tiene una mejor relación coste- eficiencia que el Nafion (Chacón, 2018).
- **Membranas de Intercambio Aniónico (AEM).**- Posee grupos funcionales cargados positivamente (Chacón, 2018). Establecen métodos de permselectividad de aniones específicos a través de la membrana de intercambio de aniones mediante un proceso de electrodiálisis (Fernández et al. 2021).
- **Membranas Bipolares (BPM).**- Formadas por la unión de una capa de intercambio catiónico y una capa de intercambio aniónico, generando un efecto de un campo eléctrico, donde el agua que se encuentra en la membrana se separa formando protones y iones hidroxilo (Chacón, 2018).

2.2.3. *Potencial Electrogénico*

El potencial electrogénico o bioelectrogénesis, conlleva la producción de bioelectricidad a través de bacterias electrogénicas como las del género *Delftia*, que son capaces de intercambiar electrones con superficies conductoras (electrodos) y generar corriente eléctrica a partir de la descomposición de materia orgánica presente, estableciendo así, un catalizador idóneo para eliminar contaminantes ya sea de aguas residuales, o de cualquier sitio que se encuentre contaminado por una amplia gama de sustratos, tales como hidrocarburos, compuestos orgánicos, inorgánicos e incluso metales pesados (Condori y Torres, 2019, p. 28).

2.2.4. *Sustratos*

Los sustratos son una parte clave y fundamental en el combustible de las MFCs, dado que, a partir de ello se genera electricidad. Los sustratos se clasifican de dos tipos: los puros y complejos. Los

sustratos puros tales como; la glucosa, acetato, lactosa, xilosa, almidón, maltosa, etanol, formiato, se caracterizan por ser de fácil y rápida degradabilidad, aunque de poca accesibilidad debido a su alto costo, mientras que, los sustratos complejos provenientes de aguas generadas por actividades industriales, aguas residuales domésticas o de residuos orgánicos, son de mayor accesibilidad debido a su bajo costo. Estos residuos complejos, son más rentables y electroquímicamente más activos, debido a su amplio microbiota (Mora y Bravo, 2018, p. 15). El mecanismo de la transferencia de electrones al ánodo y su capacidad de oxidar completamente un compuesto orgánico contribuye de manera favorable para la producción de energía cuando se utilizan bacterias dominantes como la *Delftia* con sustratos tales como glucosa y almidón (Repuello et al. 2020 p. 8).

- **Glucosa.** – Monosacárido que desarrolla un metabolismo sistemático, que puede llevarse a cabo, en presencia o ausencia de oxígeno. Este mecanismo básicamente consiste en la degradación de la glucosa a piruvato, a través de etapas esencial para la obtención de energía (ATP) a partir de glucosa. La primera etapa que consiste en la degradación de los polímeros, como el glucógeno para dar glucosa, en la segunda etapa, se degrada en moléculas más pequeñas para dar piruvato y convertirse en acetil coenzima A; finalmente, esta se degrada para dar CO₂ y H₂O (Vagas, 2018).
- **Almidón.** – Fuente principal de carbohidratos para el ser humano utilizado como ingrediente funcional (espesante, estabilizante y gelificante) (Villarreal, 2018). El almidón es un homopolisacárido constituido por unidades de D-Glucosa que se encuentra en abundancia tanto en semillas, granos, frutos y tubérculos, siendo la principal fuente de energía en los vegetales. El almidón está compuesto de dos formas: amilosa que no es soluble en agua y amilopectina que es parcialmente soluble en agua; ambos polisacáridos con funciones diferentes y capaces de ser degradadas por enzimas amilasa y glucosidasa. (Salazar, 2018, p. 59).
- **Aguas Residuales.** – Las aguas residuales están contenidas de microorganismos, capaces de oxidar la materia orgánica y ceder electrones a un ánodo, generando una corriente eléctrica hacia el cátodo, aceptando electrones generalmente O₂ (Sette, 2021 p. 114).

2.2.5. *Inóculos*

- **Residuos orgánicos.** - La combinación de residuos orgánicos sólidos de frutas y vegetales en relación de 50:50 en peso, incrementa la viabilidad para la obtención de bioelectricidad (Guambo, 2021). Esta relación permite que el combustible (sustrato), alimente al ánodo al

oxidarse y debido a la acción de los microorganismos, genera la producción de electrones externamente hacia el cátodo, corriente de electrones indispensable para la alimentación del dispositivo eléctrico; y protones que se trasladan a través del electrolito hasta cámara catódica donde se combina los electrones con el oxígeno, dando paso a un proceso de reducción para la producción de agua (De Santana, 202, p. 5).

2.3. Bases Conceptuales

2.3.1. Celdas de Combustible Microbianas

Las celdas de combustible microbianas (MFC), son dispositivos conformados por una cámara anaeróbica por donde ingresa el efluente a tratar para posteriormente ser oxidado en una reacción facilitada por las bacterias; estas bacterias utilizan diferentes aceptores de electrones, diferentes del oxígeno como nitratos (NO_3^-), Ion férrico (Fe^{3+}), Sulfatos (SO_4^{2-}), carbonatos (CO_3^{2-}) y ciertos compuestos orgánicos; también cuenta con una cámara aeróbica, donde el oxígeno disuelto se reduce para formar electrones (Jiménez et al. 2018 p. 336).

Las MFCs tienen la función de degradar u oxidar la materia orgánica o inorgánica, mediante microorganismos, además, de mantener el flujo permanente de electrones, los cuales permiten alimentar la generación continua de corriente, esto gracias a que se las reacciones redox, son medidas por microorganismos como catalizadores biológicos (Condori y Torres, 2019, p. 29). La figura 1-2 representa el principio de funcionamiento de una MFC.

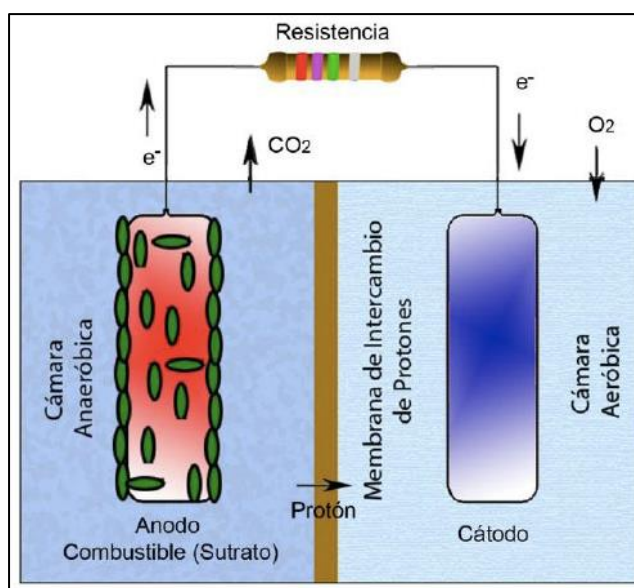


Ilustración 2-2: Principio de funcionamiento de MFC

Fuente: (Cimadevilla y Carvajal, 2020).

2.3.2. *Bacterias electrogénicas.*

Las bacterias electrogénicas utilizan láminas de materiales conductores y sustancias químicas que les permite almacenar energía y posteriormente transformarla en bioelectricidad en condiciones anaerobias (Condori y Torres, 2019). Entre las bacterias más relevantes por su capacidad de bioelectrogénesis están las del género *Delftia*, que se caracterizan por poseer una amplia gama de aceptores terminales de electrones (Medina, 2018).

2.3.3. *Membranas para producir bioelectricidad.*

- **Membrana a base de almidón.** – Biomembrana contenida de sustratos de almidón, ideales en la producción de energía. Adicionalmente, de ser fácil de dosificar y almacenar a diferencia de otros sustratos, presentan una imagen más ecológica generando menor impacto ambiental (Robledo et al. 2020 p. 164). La figura 3-2. Ejemplifica una Biomembrana a base de almidón.



Ilustración 3-2. Membrana a base de almidón.

Fuente: (Tiwari, 2019).

- **Membrana de lana de vidrio.** - Material utilizado actualmente como un aislante térmico en celdas de combustible microbianas por su excelente comportamiento de absorción de cualquier material o sistema que mide la fracción de energía que incide (Posada, 2022).
- **Membrana de Nafion.** - Las membranas de este tipo, son mayormente requeridas en procesos de celdas de combustible microbianas. La estructura química de polímero es a base de cadenas de carbón fluoronado con grupos finales de ácido perflurosulfónico, de

cual se genera rigidez, estabilidad química e incremento de la acidez de los grupos sulfónico terminales (Tito, 2018), como se encuentra detallado en la Figura 4-2.

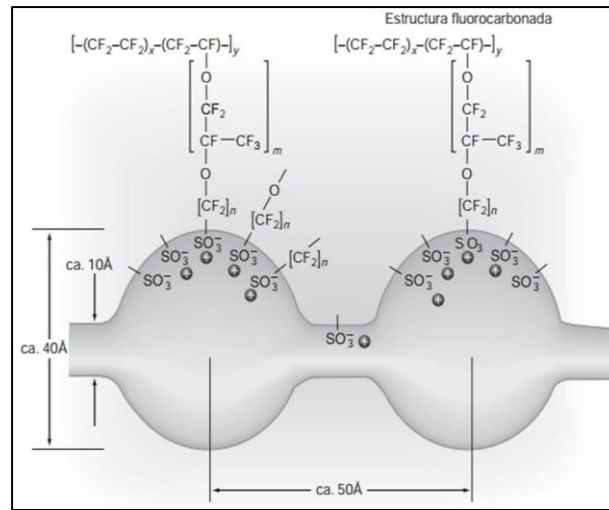


Ilustración 4-2. Estructura química de ionómero Nafion y del canal y clúster iónico de una membrana.

Fuente: (Tito, 2018)

2.3.4. Lixiviados

La lixiviación es el proceso de descomposición de la materia orgánica, del cual se extrae a través de métodos fisicoquímicos de fase líquida producto del cual, se arrastran con ello una variedad de partículas y ácidos grasos que, al reaccionar con metales pesados, tales como, el plomo, mercurio, cromo, entre otros; contenidos en los residuos orgánicos, son disueltos y transportados a través del suelo hasta su infiltración hacia aguas superficiales y subterráneas como consecuencia de la dispersión de lixiviados (López, et al. 2021).

La lixiviación está determinada mediante mecanismos de lixiviación directa, que trata sobre un proceso biológico donde las bacterias ferroxidantes pueden lixiviar sulfuros metálicos sin la participación del sulfato férrico (Sánchez y Luján, 2021). También puede estar comprendida por un proceso de lixiviación indirecta, que se da en ausencia de oxígeno o de bacterias, responsables de la lixiviación de minerales sulfurados de cobre (Sánchez y Luján, 2021).

2.3.4.1. Contaminación por lixiviados

- **Contaminación hídrica.** - Los lixiviados son conocidos como aguas residuales de naturaleza compleja, provenientes de la descomposición de sólidos, generados cuando la cantidad de humedad sobrepasa el área del terreno las sustancias podrían infiltrarse a través de la porosidad de los suelos, afectando directamente aguas superficiales, como también, atravesar el nivel freático y contaminar superficies saturadas de acuíferos. Los lixiviados generalmente son tratados a través de métodos in situ, utilizando una combinación de tratamiento físico-químico como biológico (Amaguaya, 2019). Es necesario recalcar que los procesos biológicos anaerobios es una opción eficaz y económica en tratamiento de aguas residuales, porque las condiciones climáticas de los países cálidos, favorecen a la degradación del microorganismo (Amaguaya, 2019); por otra parte, si lo que se pretende disminuir son concentraciones bajas de DBO5 y DQO, este tipo de tratamiento es ideal, cuando la cantidad de energía consumible y de producción de lodos son bajas, en caso de no ser así, la determinación del caudal permitirá establecer si los procesos biológicos convencionales son efectivos para eliminar la carga del contaminante del lixiviado, o si a su vez requiere de un sistema de tratamiento alternativo con el uso de membranas en MFC (Jaramillo et al. 2020, p. 5).
- **Contaminación de suelos.** - Los suelos son contaminados en un gran porcentaje por actividades antropogénicas en industrias, ganadería, agricultura o a su vez, por una mala gestión de los desechos especialmente en rellenos sanitarios, lugares que sirven como disposición final de los residuos domésticos. Estos terrenos donde se da en gran cantidad, la descomposición de los residuos y percolación de los líquidos podrían provocar graves daños a la salud humana y al medio ambiente, si los tratamientos o procesos operacionales no son realizados correctamente, ya que estos suelos se caracterizan por poseer una alta carga química y microbiana, ante estos procesos siempre es necesario realizar una disposición adecuada de estos contaminantes para evitar o menoscabar daños ambientales (Amaguaya, 2019). Los lixiviados actualmente están enfocados a investigaciones con problemas de contaminación de suelos por residuos de vegetales y frutas, para posteriormente ser aprovechables como sustrato en celdas de combustible microbiana, para la producción de bioelectricidad a partir de los microorganismos electrogénicos (Bonilla del Pozo, 2018).

2.3.5. Cultivos axénicos

Los cultivos axénicos de bacterias electrogénicas (*Delftia Acidovorans*) influyen en la concentración de materia orgánica presente en lixiviados de residuos orgánicos implementados en celdas de combustible microbianas. Los cultivos axénicos se obtuvieron de suelos altoandinos de la provincia de Chimborazo, debido a las propiedades óxido-reductoras que poseen dichos lugares; lo cual permite condicionar la actividad microbiana que evidencia la producción de bioelectricidad, según investigaciones realizadas por el grupo de investigación GIDAC. (Logroño et al., 2014, pp.61-68).

2.3.6. Inóculos bacterianos

El metabolismo celular de las bacterias electrogénicas es quimiorganótrofo anaerobio, esto quiere decir que estas utilizan compuestos orgánicos como principal fuente de energía y de carbono para su desarrollo y crecimiento (Medina, 2018); por tal razón, al combinar residuos orgánicos sólidos de frutas y vegetales en relación de 50:50 en peso, incrementando la viabilidad para la obtención de bioelectricidad (Guambo, 2021). Esta relación permite que el combustible (sustrato), alimente al ánodo al oxidarse y debido a la acción de los microorganismos, genera la producción de electrones externamente hacia el cátodo, corriente de electrones indispensable para la alimentación del dispositivo eléctrico; y protones que se trasladan a través del electrolito hasta cámara catódica donde se combina los electrones con el oxígeno, dando paso a un proceso de reducción para la producción de agua (De Santana, 202, p. 5).

2.4. Bases legales

2.4.1. Constitución de la República del Ecuador:

- **Art 387.- Será responsabilidad del Estado**

1. Facilitar e impulsar la incorporación a la sociedad del conocimiento para alcanzar los objetivos del régimen de desarrollo.
2. Promover la generación y producción de conocimiento, fomentar la investigación científica y tecnológica, y potenciar los saberes ancestrales, para así contribuir a la realización del buen vivir, al Sumak Kawsay.
3. Asegurar la difusión y el acceso a los conocimientos científicos y tecnológicos, el usufructo de sus descubrimientos y hallazgos en el marco de lo establecido en la Constitución y la Ley.
4. Garantizar la libertad de creación e investigación en el marco del respeto a la ética, la

naturaleza, el ambiente, y el rescate de los conocimientos ancestrales.

5. Reconocer la condición de investigador de acuerdo con la Ley.

- **Art 400.- Sección II- Biodiversidad**

El Estado ejercerá la soberanía sobre la biodiversidad, cuya administración y gestión se realizará con responsabilidad intergeneracional.

Se declara de interés público la conservación de la biodiversidad y todos sus componentes, en particular la biodiversidad agrícola y silvestre y el patrimonio genético del país.

2.4.2. Leyes

- **Art. 80.- Vertidos: prohibiciones y control.**

Se consideran como vertidos las descargas de aguas residuales que se realicen directa o indirectamente en el dominio hídrico público. Queda prohibido el vertido directo o indirecto de aguas o productos residuales, aguas servidas, sin tratamiento y lixiviados susceptibles de contaminar las aguas del dominio hídrico público. La Autoridad Ambiental Nacional ejercerá el control de vertidos en coordinación con la Autoridad Única del Agua y los Gobiernos Autónomos Descentralizados acreditados en el sistema único de manejo ambiental. Es responsabilidad de los gobiernos autónomos municipales el tratamiento de las aguas servidas y desechos sólidos, para evitar la contaminación de las aguas de conformidad con la ley.

2.4.3. Normativas

Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA).

Anexo 1. Libro VI. - Los lixiviados generados en los rellenos sanitarios cumplirán con los rangos y límites establecidos en las normas de descargas a un cuerpo de agua.

2.4.4. Reglamentos

Art. 73.- Manejo de desechos biodegradables.- El vertido, disposición y tratamiento de los desechos

biodegradables se lo realizará priorizando lo siguiente:

- a) Tratamiento in situ.- Como mínimo deberá considerar la impermeabilización, canaletas para recolección de lixiviados, tratamiento de lixiviados, recubrimiento del área de depósito y control de plagas.

- b) Entrega a los Gobiernos Autónomos Descentralizados que cuenten con rellenos sanitarios autorizados por la Autoridad Ambiental competente.
- c) Relleno sanitario controlado.- se deberá justificar técnicamente su ubicación, diseño, construcción, instalación y operación, considerando las normas técnicas expedidas por el Ministerio del Ambiente. Una vez concluidos los trabajos o cuando se haya cubierto su capacidad, dichos rellenos serán clausurados y sellados adecuadamente y reacondicionada su capa superficial.

CAPÍTULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

3.2. Enfoque de investigación

3.1.1 Cuantitativa

De tipo cuantitativa debido a que el presente estudio se centró en recopilar datos numéricos de dos variables dependientes: Generación de bioelectricidad (VCD) y Remoción de materia orgánica de lixiviados (DBO) de MFCs construidas con dos tipos de membrana de intercambio protónico (MIPs). Estos valores al ser evaluados estadísticamente permitieron obtener resultados fiables para la comprobación de la hipótesis planteada.

3.3. Nivel de investigación

3.3.1. *Explicativo*

La principal relación a estudiar en esta investigación producto del fenómeno de conversión de energía electroquímica a eléctrica (Mantell, 2021), fue la generación de voltios de corriente directa producto de la construcción y conformación de MFCs con membranas de intercambio protónico (maghemita y fibra de carbono), lixiviados e inóculo axénico de *Delftia Acidovorans*.

3.4. Diseño de investigación

3.4.1. *Tipo experimental*

Se manipuló intencionalmente las variables independientes, con la finalidad de generar una acción en las membranas electrogénicas de las MFCs, de tal modo, que permitió describir su efecto y analizar los resultados; en consecuencia, corresponde a un diseño de un factor de tres niveles y dos repeticiones (Tabla 1-3).

Tabla 1-3. Diseño Experimental.

Factor MIPs*		Repeticiones	
Niveles	MIP de Fibra de Carbono (1)	MFC 1-1	MFC 2-1
	MIP de fibra de carbono y Maghemita (2)	MFC 1-2	MFC 2-2
	MIP de fibra de carbono y Maghemita con tratamiento térmico (3)	MFC 1-3	MFC 2-3
* Membrana de intercambio de protones.			

Realizado por: Revelo, Itzayana, 2022 (GIDAC).

3.5. Población, selección y cálculo del tamaño de la muestra

3.5.1. Población de estudio

- Lixiviados.** - El mercado está conformado por un sistema de recolección y separación de residuos sólidos, donde los comerciantes depositan los residuos tanto orgánicos como inorgánicos en múltiples contenedores denominados como naves, con el propósito de incrementar la seguridad e higiene en el manejo y almacenamiento adecuado de los residuos. Los residuos orgánicos seleccionados sirvieron de sustrato en una MFC, incidiendo en la producción de bioelectricidad y convirtiéndolo en fuente de combustible.



Ilustración 5-2. EP-EMMPA San Pedro de Riobamba

Fuente: (Google,2022).

- **Inóculo bacteriano.** – Las bacterias electrogénicas correspondientes al género *Delftia Acidovorans*, presentan propiedades oxido-reductoras, convenientes en el proceso de generación de energía en MFC. Las bacterias adquiridas, las suministró el Laboratorio de Ciencias Biológicas de la Facultad de Recursos Naturales de la ESPOCH (Mazo, 2020).
- **Membranas.** – La maghemita es una membrana de intercambio de electrones, idóneo en el potenciamiento de voltaje y eficiencia en la producción de bioelectricidad, sintetizada a partir de disoluciones de cloruro férrico y cloruro ferroso, convirtiéndose en una red conductora de electricidad adicional por ser un nanomaterial óptimo en la generación estable de voltaje en una MFC (Gallego, 2018 p. 110).

3.5.2. *Tamaño de la muestra*

- **Lixiviados.** - Los residuos sólidos, fueron extraídos del Mercado Mayorista: EP-EMMPA San Pedro de la ciudad de Riobamba; tomados de múltiples contenedores de basura que reposan en dicho mercado (Figura 5-3). El horario en que se recolectaron los desechos orgánicos fue a partir de las (14:00 p.m.) hora de mayor afluencia de estribadores que abastecen de alimentos en cada una de las naves, esto provoca que los comerciantes hagan una selección de los alimentos y prescindan de desechos orgánicos.



Ilustración 6-3. Recolección de residuos sólidos.

Realizado por: Revelo, Itzayana, 2022 (GIDAC).

La recolección de los residuos sólidos, se la realizó mediante una muestra compuesta en una proporción 50:50 en peso; es decir se recolectó de 4 clases de residuos 1.5 kg de frutas y 1.5 kg de vegetales (Tabla 2-3). Posteriormente los residuos fueron mezclados y triturados hasta obtener todo el líquido posible, convirtiéndose en el sustrato de las MFCs.

Tabla 2-3. Residuos sólidos recolectados

1.5 kg FRUTAS	1.5kg VEGETALES
✓ Banano	✓ rábano
✓ Mandarina	✓ zanahoria
✓ Naranja	✓ tomate
✓ papaya	✓ pimienta

Realizado por: Revelo, Itzayana, 2022 (GIDAC).

- **Inóculo bacteriano.** - La bacteria electrogénica, *Delftia Acidovorans*, se sembró en un medio de cultivo enriquecido, del cual se tomó 2ml de inóculo por cada 125 ml de volumen de las MFCs. Las bacterias al desarrollarse en un sustrato totalmente orgánico, permitió incrementar el paso de electrones en el circuito.
- **Membranas.** - Las MFCs al estar compuesta de fibra de carbono y maghemita en la cámara anódica, contribuyó a que se produzca una variación de voltaje de corriente directa, de acuerdo a la superficie de las membranas, que están en contacto con el sustrato, el modo de operación y configuración de la cámara anódica en la celda

3.5.3. Cálculos

- **Obtención de lixiviado.** - Los cálculos que se realizaron para la obtención de lixiviados, se basaron en datos de la estación meteorológica de la ESPOCH, donde se determinó que, en la ciudad de Riobamba, entre los meses de enero 2022 hasta agosto 2022 se obtuvo una media de precipitación de 3.21 mm (Tabla 3-3). El cálculo se efectuó en base al área del contenedor y la capacidad del mismo, permitiendo obtener litros de lixiviados puros (Tabla 4-3).

- 1) **Área del contenedor:** 0.171m²
- 2) **Capacidad del contenedor:** 65kg

Tabla 3-3. Obtención de agua lluvia

Área - Agua lluvia		
Por cada 1m ² hay	Agua lluvia 1L	Precipitación 1mm
0.171 m ²	0.171L	3.21mm
X= 0.171L * 3.21 mm = 0.549L de agua lluvia.		

Realizado por: Revelo, Itzayana, 2022 (GIDAC).

Tabla 4-3. Obtención de lixiviado puro

Capacidad del contenedor- Agua lluvia	
Residuos 65 kg	Agua lluvia 0.549 L
Por cada 7kg de residuos se necesita añadir X= 0.059	
Se obtuvo 1.5 L (lixiviado puro) + 59 mL (agua comercial Tesalia).	

Realizado por: Revelo, Itzayana, 2022 (GIDAC).

- **Adición del inóculo bacteriano.** – Para obtener la bacteria *Delftia Acidovorans*, fue necesario realizar el aislamiento en cultivo puro a través de la técnica de siembra en medio líquido. Este procedimiento se llevó a cabo en una cámara de flujo laminar con el fin de tener ambientes libres de contaminación. El método que se utilizó fue no probabilístico, es decir; que las bacterias fueron seleccionadas por el investigador con el fin de emitir juicios personales una vez culminado el procedimiento.

Inicialmente, se pesó 0.19g de polvo del medio de cultivo y se mezcló en 200mL de agua destilada, la muestra se homogenizó en un matraz Erlenmeyer de 250 mL, posteriormente se fijó tubos de ensayo que servirían para sembrar el medio de cultivo y se llevó a proceso de esterilización en autoclave a una temperatura de 121°C por 15 minutos, esto permitió inocular la bacteria en un ambiente más aséptico. Una vez concluido el tiempo, en una cabina de flujo laminar y con la ayuda de una pipeta volumétrica graduada, se tomó 7mL de caldo nutritivo depositando la misma cantidad en los 6 tubos de ensayo, seguidamente con la ayuda de una pipeta automática de volumen fijo de 100 uL, se tomó la solución inyectable de la bacteria *Delftia Acidovorans* y lo transferimos en los tubos respectivos, finalmente la muestra se llevó a estufa por 48 horas, con una temperatura de 28°C, simulando a una temperatura ambiente para su correcto crecimiento bacteriano (Figura 6-3).

Volumen celda —→ volumen inóculo
Por cada 125mL —→ 2mL de inóculo

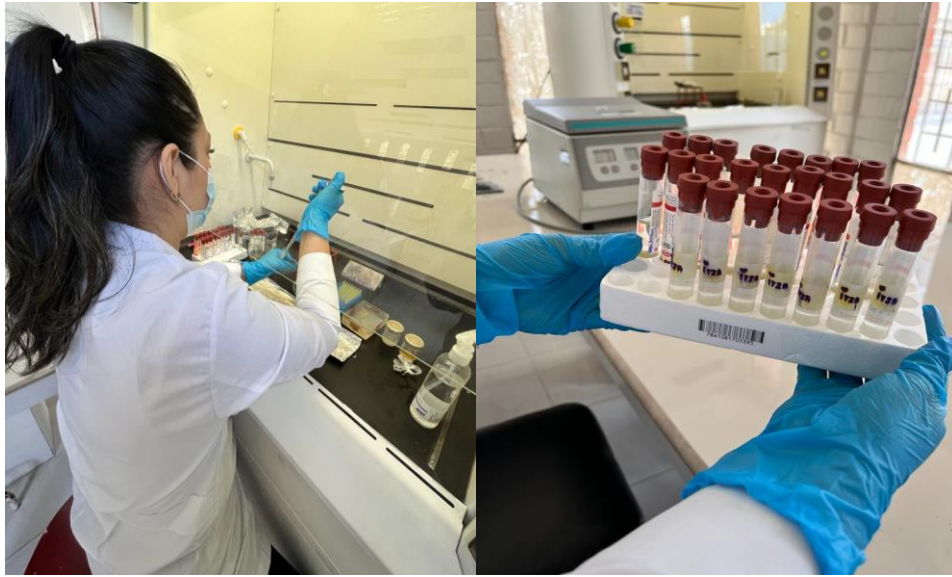


Ilustración 7-3. Inoculación de la bacteria *Delftia Acidovorans*.

Realizado por: Revelo, Itzayana, 2022 (GIDAC).

3.5. Métodos, técnicas e instrumentos de investigación

3.5.1. *Diseño y construcción de las MFCs*

- **Diseño de las MFCs.** - El diseño de las MFCs fue de configuración simple, compuesto de dos cámaras: una anódica y otra catódica unidas a través de membranas de intercambio protiónico. La cámara anódica estuvo comprendida por un cilindro de acrílico transparente con base cuadrada de 7.5 x7.5 cm para mayor estabilidad, un diámetro de 50mm, una altura de 63.6 mm y un orificio de 13 mm en la pared del cilindro para alimentar al sustrato, mientras que la cámara catódica compuesta por una placa inferior de acrílico de 2 líneas y una superior de 3 líneas. Por otra parte, las membranas que se introdujeron entre las placas de acrílico, fueron de fibra de carbono de 0.8mm de espesor y 2g de maghemita (figura 7-3).

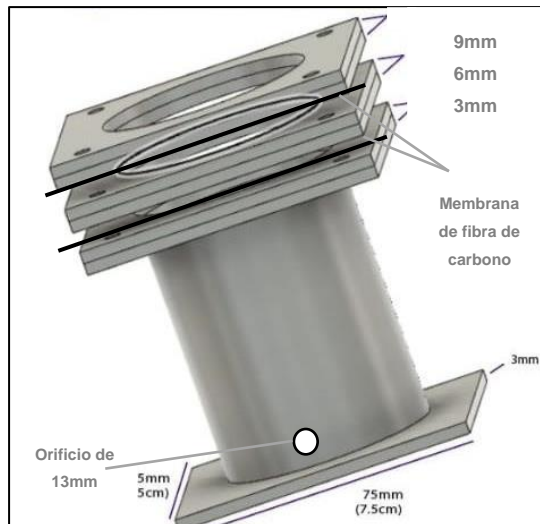


Ilustración 8-3. Diseño de las MFCs.

Realizado por: Revelo, Itzayana, 2022 (GIDAC).

3.5.2. *Tratamiento y obtención de membranas*

- Fibra de carbono.** – Las membranas se recortaron de acuerdo al molde de las MFCs, tomando una forma de H y evitando que ninguna de ellas quede en contacto con el caucho o tornillos que contiene las celdas; de tal modo, que se evita que ocurra una falla en el paso de electrones. Una vez dada la forma correcta de las membranas catódicas, se lavaron por 5 veces con agua desionizada; finalmente se conservaron en fundas Ziploc hasta su uso; por el contrario las membranas anódicas tuvieron un tratamiento más extenso que consistió en recortarlas y sumergirlas en acetona industrial por 12 horas, luego se lavaron 5 veces con agua comercial tesalia que, por su capacidad de contener iones ayudan al transporte de electrones; los lavados se realizaron con el fin de eliminar sobrantes del disolvente (Figura 8-3). Posterior a eso, se preparó una solución con 50 g de sulfato de amonio en 250mL de agua destilada, una vez lista la solución se procedió a sumergir las membranas durante 15 minutos. Una vez el tiempo transcurrido fueron sumergidas nuevamente en una solución compuesta de 25 mL de ácido sulfúrico con 250mL de agua tesalia por 10 minutos. Como último paso las membranas anódicas se colocaron en un horno mufla a una temperatura de 400°C por un lapso de tiempo de 10 minutos, se hizo un último lavado de membranas y se almacenó en una funda Ziploc (Mazo, 2020).



Ilustración 9-3. Tratamiento de membranas A: Recorte de membranas. B: Lavado de membranas. C: Secado de membranas anódicas.

Realizado por: Revelo, Itzayana, 2022 (GIDAC).

- **Maghemita.** – Para la obtención de nanopartículas de maghemita, se basó en la técnica de Gallego (2018), en donde se mezcla $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ y $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ a una relación (2:1), en 50 ml de agua desionizada; es decir, se obtuvo una solución al 2M de cloruro férrico y 1M de cloruro ferroso.

$$1) \frac{1 \text{ mol } \text{FecCl}_3}{1000 \text{ ml } \text{FecCl}_3} \times 250 \text{ ml} \times \frac{270.33 \text{ g}}{1 \text{ mol } \text{FecCl}_3} \times \frac{100 \text{ g}}{97 \text{ g}} = 27.86 \text{ g } \text{FecCl}_3$$

$$\frac{27 \text{ g}}{250 \text{ ml}} \times \frac{1000 \text{ ml}}{1 \text{ L}} \times \frac{1 \text{ mol}}{270.33 \text{ g}} \times \frac{97 \text{ g}}{100 \text{ ml}} = 0.38 \text{ M } \text{FecCl}_3$$

$$2) \frac{0.5 \text{ mol } \text{FecCl}_2}{1000 \text{ ml } \text{FecCl}_2} \times 100 \text{ ml} \times \frac{198.81 \text{ g}}{1 \text{ mol } \text{FecCl}_2} = 9.94 \text{ g } \text{FecCl}_2$$

$$\frac{9.94 \text{ g}}{250 \text{ ml}} \times \frac{1000 \text{ ml}}{1 \text{ L}} \times \frac{1 \text{ mol}}{198.81 \text{ g}} = 0.199 \text{ M } \text{FecCl}_2$$

Una vez obtenido los cálculos respectivos, se añadió a un vaso de precipitación 27.86g de cloruro férrico con 9.94g de cloruro ferroso, seguidamente colocamos el vaso de precipitación contenido de los cloruros de hierro a un agitador magnético, a una temperatura de 70°C, con el fin de mantener los reactivos en agitación constante. Por otra parte, se mezcló en un matraz aforado 12g de hidróxido de sodio (NaOH), con 200ml de agua desionizada, con la ayuda de una varilla lo agitamos para favorecer a la disolución del soluto añadido al disolvente.

Una vez listos los reactivos necesarios, procedimos a agregar los 12g de NaOH diluidos en los 200ml de agua desionizada, dejando caer gota a gota la solución básica a la mezcla de cloruros de hierro. Esta mezcla se mantuvo con nitrógeno por aproximadamente 2 horas, facilitando la formación de grumos de color negro que visualmente se reflejaba la efectividad en la síntesis de maghemita. Al culminar con la práctica, se midió el pH, obteniendo resultados de alcalinidad en la solución, corroborando así, que los ácidos fuertes presentan altas concentraciones de hidrógeno en comparación al agua pura.

Finalmente, se eliminó el sobrenadante de la muestra y el precipitado obtenido fue lavado con 250ml de etanol y centrifugado a 3000rpm por 10 minutos; una vez transcurrido el tiempo, se realizó un segundo lavado con 1L de agua desionizada, con el propósito de eliminar los excesos de cloruros, posteriormente la muestra fue llevada a centrifugar nuevamente a 3000rpm durante 10 minutos. Luego, desechamos el sobrenadante de la muestra y el precipitado recolectado, se secó en una mufla durante 3 días, luego se pesó la muestra, obteniendo 10g totales de maghemita. Para la síntesis de maghemita con tratamiento térmico, únicamente se tomó la muestra final y se introdujo a una mufla con temperatura de 100°C, por un paso de tiempo de 3 horas. Al término del tiempo se dejó enfriar la maghemita dentro de la mufla para una mayor cristalinidad (Figura 9-3)

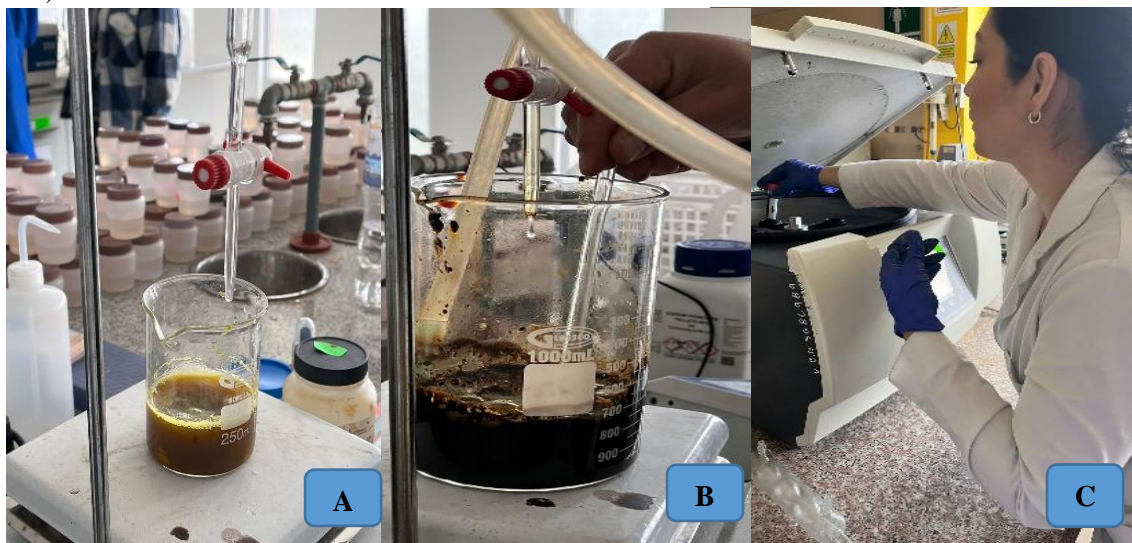


Ilustración 10-3. Síntesis de maghemita. A: Mezcla de cloruro férrico y ferroso. B: Incorporación de nitrógeno a la muestra. C: Centrifugación

Realizado por: Revelo, Itzayana, 2022 (GIDAC).

- **Construcción de las MFCs.** - El tratamiento de los compartimientos de las MFCs al igual que todos los elementos que se utilizaron en la construcción de las celdas de combustible microbianas, se introdujeron en una cámara de flujo laminar del Laboratorio de Ciencias

Biológicas de la Facultad de Recursos Naturales para esterilizarlos a través de un método básico de luz UV durante 10 minutos, posteriormente se incorporó en el interior de cada una de las MFCs, una cama de lixiviado, seguido de la inoculación de la bacteria *Delftia Acidovorans*, una vez concluido con ello, se dio continuidad al ensamblaje de las cámaras anódicas y catódicas.

Inicialmente, el acrílico inferior de 3mm se cubrió con un empaque de caucho hecho a medida de las láminas de acrílico y se colocó por encima la membrana anódica para las 6 MFCs. Posteriormente para la MFC1-1 y MFC 2-1 se cubrió a la membrana con una lámina de celofán, seguido el acrílico de 6mm, la membrana catódica y finalmente se añadió la lámina de acrílico de 9 mm. Para la MFC 1-2 y MFC 2-2 se mantuvo el mismo procedimiento que las primeras celdas de combustible microbianas, pero con la diferencia de que estas celdas fueron espolvoreadas por encima de la membrana anódica con 2 gramos de maghemita, igualmente se cubrió con papel celofán, acrílico de 6mm, se insertó la membrana catódica y se colocó al final el acrílico de 9mm. Mientras que la MFC 1-3 y MFC 2-3 se continuó con el mismo procedimiento de ensamblaje a diferencia de que en estas últimas MFCs, se esparció 2 gramos de maghemita con tratamiento térmico en toda la membrana anódica. Todas las MFCs fueron ajustadas en sus extremos con tornillos para evitar que se descoloquen las membranas y haya derrame de sustrato (Figura 10-3).



Ilustración 11-3. Armado de las MFCs.

Realizado por: Revelo, Itzayana, 2022 (GIDAC).

3.5.3. Monitoreo y seguimiento de la investigación

3.5.3.1. Análisis de Lixiviado

Para determinar los porcentajes de remoción de, DQO, DBO y Nitrógeno amoniacal, fue necesario realizar el procedimiento de diluciones seriadas. Este factor permitió comprobar que tan diluido está la última muestra con respecto a la primera; siendo la tercera dilución seleccionada para determinar cuanta degradación de materia orgánica existió en los sustratos.

- **Nitrógeno amoniacal.** – El 4500-NH₄-C es un método volumétrico que permitió monitorear el porcentaje de degradación natural de la materia orgánica proveniente específicamente en esta investigación de la descomposición de frutas y vegetales. La metodología implementada, consistió en incorporar 25 mL de lixiviado en un vaso de precipitación; posteriormente dejar caer 4 gotas de estabilizador mineral y 4 gotas más de agente dispersante de alcohol de polivinilo a las 6 muestras de lixiviado que inicialmente fue sometido a un proceso de factor de dilución de 250mL. (Figura 11-3). Ambos reactivos químicos usados para detectar cantidades de amoniaco y nitrógeno, subsiguientemente, se agregó a la misma muestra 1mL de reactivo de Nessler, usado especialmente para la detección cualitativa de compuestos de amonio y amoniaco (Celi, 2021).



Ilustración 12-3. A: Incorporación del estabilizador mineral y del agente dispersante de alcohol de polivinilo. B: Reactivo Nessler.

Realizado por: Revelo, Itzayana, 2022 (GIDAC).

- **DQO.** – Por medio del método colorimétrico 5220-D para medición de DQO, se dispuso a colocar 2mL de lixiviado en los 6 tubos de ensayo, mezclados con 20mL de lixiviado tomado de la tercera dilución (Figura 12-3). Seguidamente la muestra se agitó ligeramente y se colocó en un digestor de DQO a 160°C por dos horas, una vez culminado el tiempo, se tomó lectura de los valores y se comparó con el valor inicial del análisis de demanda química de oxígeno (Celi, 2021).



Ilustración 13-3. Análisis de DQO.

Realizado por: Revelo, Itzayana, 2022 (GIDAC).

- **DBO.** – El método estándar 5210-B, se usó para determinar después de 5 días la cantidad de oxígeno que la bacteria *Delftia Acidovorans* consumió durante la descomposición de materia orgánica en la muestra y por consiguiente conocer el grado de contaminación del sustrato. Para ello, se utilizó un frasco hermético en donde se depositó 25 mL de sustrato con 2mL de inhibición de nitrificación (Figura 13-3) (Celi, 2021).



Ilustración 14-3. Análisis de DBO5.

Realizado por: Revelo, Itzayana, 2022 (GIDAC).

- **pH.** – Se realizaron mediciones de pH durante los 15 días de monitoreo de las MFCs, a través del método de análisis 4500-H-B: empleado para medir pH de aguas residuales. La muestra inicial del lixiviado fue de 4,33 que, con el transcurso de los días establecidos, este ascendió a 5,78 pasando de tener un pH ácido a neutro según la escala de pH (Figura 14-3). Es importante considerar que el aumento del potencial de hidrógeno ayuda a la eliminación de DQO y por consiguiente existe un mejor rendimiento en cuanto a la producción de voltaje (Celi, 2021).



Ilustración 15-3. Control de pH.

Realizado por: Revelo, Itzayana, 2022 (GIDAC).

3.5.4. Operacionalización de las MFCs

El monitoreo y almacenamiento de datos de voltaje generados por las MFCs, se obtuvo mediante un sistema de adquisición de datos, usando un Arduino compuesto de 3 conversores que operó bajo un modelo de recolección de datos digital, ejecutado por el software LabView, que proporcionó los datos automáticamente en un lapso de tiempo de 60 segundos hacia el ordenador, durante 15 días, cumpliendo con los ciclos de 24 horas, para obtener un promedio global de voltaje (Rivas, 2022).

3.5.5. Materiales e instrumentos experimentales

En la tabla 5-3 se describen los equipos, materiales de laboratorio y cantidades que se utilizaron durante las diferentes etapas del desarrollo de la investigación.

Tabla 5-3. Recursos utilizados en el desarrollo de la investigación

Etapa de la investigación	Equipos y materiales	Cantidad	Sustancias y reactivos
Muestreo de residuos y obtención de lixiviados	Fundas Ziploc Balanza Guantes	1 1 1	Agua desionizada
Tratamiento de las MFCs	Vasos de precipitación de 500mL Matraz balón de 500mL Probeta de 100mL Pipeta 10mL Pera de succión Mufla	2 1 1 1 1 1	Acetona industrial Sulfato de amonio Agua comercial Tesalia Ácido sulfúrico Agua desionizada
Inoculación bacteriana	Probeta 100mL Balanza analítica Erlenmeyer 250mL Pipeta volumétrica Micropipeta Puntas de 1mL Lámpara de alcohol Cámara de flujo laminar Autoclave Mufla	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	Agar nutritivo Agua desionizada Bacteria (<i>Delftia Acidovorans</i>).
Síntesis de maghemita	Agitador magnético Vaso de precipitación de 500mL Centrifugadora Pipeta volumétrica Mufla Soporte universal Pinza Varilla de agitación Papel tornasol Tubos de ensayo	1 1 1 1 1 1 1 1 4 8	Cloruro férrico hidratado Cloruro ferroso hidratado Hidróxido de sodio Agua desionizada Nitrógeno Etanol
Inoculación en MFCs	Jeringuilla de 10 y 20mL Vaso de precipitación de 250mL Alcohol Mechero Cámara de flujo laminar Toallas de papel Guantes	2 1 1 1 1 1 1	2mL de <i>Delftia Acidovorans</i> 125mL de lixiviado
Construcción de MFCs	Láminas de acrílico Cilindro de acrílicos Cortes de fibra de carbono de 0.8mm de espesor Empaques (caucho) Tornillos galvanizados Lagartos tijera Perforadora Papel celofán	24 6 12 18 24 12 1 1 1 1m2	
Operacionalización de las MFCs	Arduino Convertidores análogos ADS 1115 I2c Ordenador Cable UTP		

Realizado por: Revelo, Itzayana, 2022 (GIDAC).

3.5.6. Planteamiento de hipótesis.

Hipótesis textual. - La fabricación y uso de una membrana de intercambio de electrones en una MFC, tiene una producción de bioelectricidad superior al 10%, en la MFC compuesta de membrana de maghemita con tratamiento térmico, con respecto a la MFC contenida de fibra de carbono.

- **Hipótesis estadística.**

$$H_0 = \delta MFC_{3-1} = \delta MFC_{3-2} = \delta MFC_{3-3}.$$

$$H_a = \delta MFC_{3-1} \neq \delta MFC_{3-2} \neq \delta MFC_{3-3}.$$

Donde:

δMFC = Voltaje de corriente directa producido por la cepa *Deftia Acidovorans* y las membranas de intercambio protiónico.

CAPITULO IV

4. MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1. Monitoreo y seguimiento de la investigación.

Para llevar a cabo el monitoreo y seguimiento de la investigación, se tomaron las MFCs ensambladas, es decir, MFCs contenidas del sustrato compuesto de frutas y vegetales y suministrada con la bacteria electrogénica *Delftia Acidovorans*, así como también de la incorporación de las membranas de intercambio protiónico. Una vez listas las celdas de combustible microbianas, se procedió a conectarlas a través de un conductor de carga positiva y negativa hacia el sistema de adquisición de datos que consistió, en un Arduino 1 y 3 conversores analógicos ads115 I2c lo que permitió por medio de un ordenador recolectar automáticamente datos de voltaje cada 60 segundos durante 15 días (Figura 15- 4).

Se realizó la medición de pH en la celdas MFC 1-1 y MFC 2-1, compuestas de membrana de fibra de carbono, del mismo modo en la MFC 1-2 y MFC 2-2, contenidas de maghemita y finalmente en la MFC 1-3 y MFC 2-3 que se les incorporó maghemita con tratamiento térmico, como se muestra en la tabla 1-3, extrayendo 2ml diarios de sustrato de cada una de las MFCs para ser llevados al laboratorio del Gidac-ESPOCH y evaluar su potencial de hidrógeno, una vez realizado este proceso se reincorporó la cantidad retirada a las celdas. Este procedimiento se lo realizó durante 15 días para constatar que los sustratos de las MFCs no presenten acidez en la disolución ya que afectaría en la producción de bioelectricidad.



Ilustración 16-4. Operacionalización de MFCs.

Realizado por: Revelo, Itzayana, 2022 (GIDAC).

4.1.1. Análisis de lixiviado.

Para determinar la cantidad de remoción de contaminantes del lixiviado; inicialmente al sustrato madre se le realizó una prueba inicial, con el fin de conocer la cantidad existente de contaminantes que hay en la muestra, expresada en términos de Nitrógeno amoniacal, DQO y DBO₅ y pH; posteriormente se efectuó una prueba final del sustrato proveniente de las 6 celdas de combustible microbianas, de acuerdo al porcentaje de remoción de la materia orgánica conforme a los límites establecidos en el Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA), donde determina que el límite máximo permisible para descarga a un cuerpo de agua dulce es de 30 mg/L.

Tabla 6-3. Resultado de nitrógeno amoniacal por proceso de oxidación orgánico.

MFCs	N-NH ₄ inicial mg/L	N-NH ₄ final mg/L	% de remoción
MFC 1-1	365.0	265	27.40%
MFC 2-1		255	30.14 %
MFC 1-2		245	32.88 %
MFC 2-2		187.5	48.63 %
MFC 1-3		140	61.64 %
MFC 2-3		240	34.25 %

Realizado por: Revelo, Itzayana, 2022 (GIDAC).

La concentración de nitrógeno amoniacal inicialmente fue de 365.0 mg/L y durante su proceso de oxidación de la materia orgánica, disminuyó en un 27.40% en la MFC1-1 y un 30.14% en la MFC 2-1, ambas compuestas de fibra de carbono. El grupo con mayor remoción, fueron aquellas celdas compuestas de membrana de fibra de carbono y maghemita, como se muestra en la (tabla 6- 4), eliminando nitrógeno amoniacal en la MFC 1- 2 en un 32.88% y la MFC 2-2 en un 48.63%. De la misma forma, la MFC 1-3 combinada de fibra de carbono y maghemita con tratamiento térmico, presentó una remoción del contaminante de 61.64%, mientras que para la MFC 2-3 de 34.25%

Tabla 7-3. Resultado de análisis inicial y final del DQO.

MFCs	DQO inicial mg/L	DQO mg/L final	% de remoción
MFC 1-1	101.500	69 750	31.28 %
MFC 2-1		70 200	30.79 %
MFC 1-2		64 500	36.45 %
MFC 2-2		59 000	41.87 %
MFC 1-3		55 750	45.07 %
MFC 2-3		61 250	39.66 %

Realizado por: Revelo, Itzayana, 2022 (GIDAC).

La reducción de DQO, refleja la cantidad de oxígeno disuelto en el sustrato y consecuentemente la oxidación de la materia orgánica; como se muestra en la (Tabla 7-4), el DQO inicial fue de 101.500 mg/L y durante el proceso de monitoreo de 15 días, se notó un descenso similar entre la MFC 1-1 y MFC 2-1. Así mismo, el DQO fue removido en un 36.45% para la MFC 1-2 y 41.87% para MFC 2-2, llegando a tener valores por debajo del límite permisible para descarga de agua dulce según la norma TULSMA. Para las MFC 1-3 y MFC 2-3 la biodegradación de la biomasa fue mayor, reflejando porcentajes de remoción en un 45.07% y 39.66%, respectivamente.

Tabla 8-3. Resultado de análisis inicial y final del DBO5.

MFCs	DBO inicial mg/L	DBO mg/L final	% de remoción
MFC 1-1	96.000	57 750	39.84 %
MFC 2-1		62 250	35.16 %
MFC 1-2		28 000	70.83 %
MFC 2-2		6 000	93.75 %
MFC 1-3		4 500	95.31 %
MFC 2-3		14 500	84.89 %

Realizado por: Revelo, Itzayana, 2022 (GIDAC).

El análisis final para DBO demuestra según la (Tabla 8-4) que la remoción de materia orgánica disminuyó más del 50% en comparación con la DQO, esto ocasionado por la bacteria exógena: *Delfia Acidovorans*, que al degradar compuestos orgánicos contaminantes mostró un alto potencial en la MFC 1-2, MFC 2-2, MFC 1-3 y MFC 2-3, mejorando el tratamiento biológico dada su máxima eficiencia de eliminación de nitrógeno amoniacal y DQO a diferencia de las MFC 1-1 y MFC 2-1 que presentaron una remoción mucho menor.

Tabla 9-3. pH medido diariamente durante la experimentación.

Fecha	Día	MFC 1-1	MFC 2-1	MFC 1-2	MFC 2-2	MFC 1-3	MFC 2-3
28/10/2022	1	4.11	4.13	4.16	4.14	4.12	4.17
29/10/2022	2	4	4	4	4	4	4
30/10/2022	3	4	4	4	4	4	4
31/10/2022	4	4.12	4.14	4.16	4.29	4.17	4.33
1/11/2022	5	4.12	4.16	4.17	4.28	4.19	4.33
2/11/2022	6	4.14	4.18	4.28	4.31	4.29	4.35
3/11/2022	7	4	4	4	4	4	4
4/11/2022	8	4	4	4	4	4	4
5/11/2022	9	4	4	4	4	4	4
6/11/2022	10	4	4	4	4	4	4
7/11/2022	11	4.18	4.31	4.37	4.48	4.62	4.75
8/11/2022	12	4.29	4.36	4.45	4.52	4.78	4.89
9/11/2022	13	4.39	4.59	4.67	4.68	4.82	4.95
10/11/2022	14	4.43	4.57	4.72	4.69	5.12	5.02
11/11/2022	15	4.46	4.65	4.86	4.84	5.78	5.96

Realizado por: Revelo, Itzayana, 2022 (GIDAC).

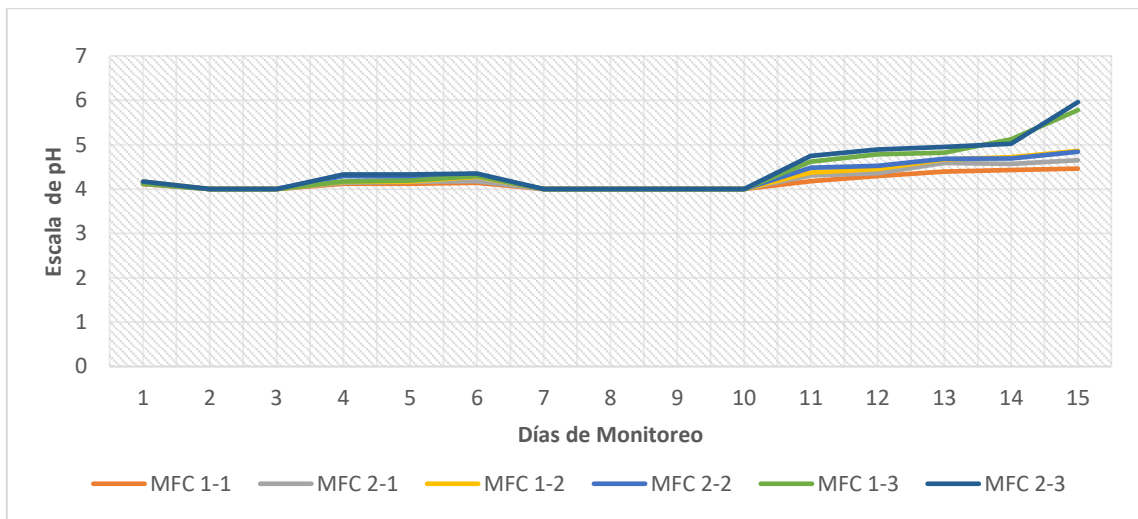


Gráfico 1-4. Monitoreo del pH durante el tiempo de experimentación

Realizado por: Revelo, Itzayana, 2022 (GIDAC).

En la tabla 9- 4 y el gráfico 2- 4, se muestra que el pH de la muestra de lixiviado, inicialmente es de 4.11 y con el transcurso de los días, este fue ascendiendo hasta llegar a un pH de 4.46, 4.65, 4.86, 4.84, 5.78, 5.96 para los tratamientos de MFC 1-1, MFC 2-1, MFC1-2, MFC 2-2, MFC 1-3, MFC 2-3 respectivamente. Al aumentar el potencial de hidrógeno, indica la reducción de acidez en la muestra y por ende la disminución de DQO y DBO en las MFC.

4.2. Operacionalización de las MFCs

Tabla 10-3. Promedio de voltaje generado en milivoltios.

Días	Celdas de combustible microbianas (MFCs).					
	MFC1-1	MFC 2-1	MFC 1-2	MFC 2-2	MFC 1-3	MFC 2-3
1	197.85	164.04	298.35	310.30	342.65	387.85
2	183.64	158.37	231.63	243.01	236.00	283.64
3	170.30	178.47	214.29	270.13	262.95	301.83
4	124.85	191.45	222.52	306.03	325.81	342.68
5	133.80	107.28	148.45	247.80	316.00	204.77
6	139.57	125.06	157.30	188.05	224.83	212.91
7	139.86	132.35	228.04	156.95	240.39	219.79
8	146.65	138.44	247.84	178.58	299.00	242.10
9	143.98	127.33	255.65	275.88	283.09	268.65
10	154.79	178.94	244.65	299.60	267.48	272.22
11	164.39	181.20	246.90	264.95	273.62	285.11
12	133.41	142.57	265.48	295.12	256.47	289.26
13	152.43	170.57	246.03	261.07	263.18	279.67
14	141.17	182.88	240.01	271.87	298.10	309.42
15	165.47	189.79	295.50	302.49	381.46	397.63
PROMEDIO GLOBAL	152.81	157.92	236.18	258.12	284.74	286.50

Realizado por: Revelo, Itzayana, 2022 (GIDAC).

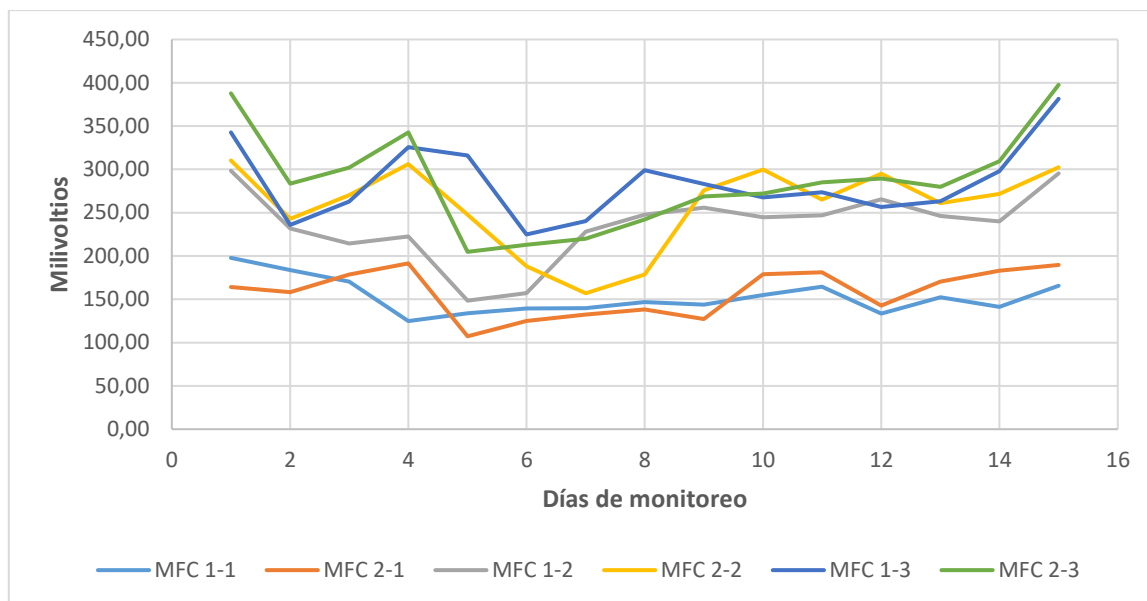


Gráfico 2-4. Voltajes finales medidos en MFCs.

Realizado por: Revelo, Itzayana, 2022(GIDAC).

El monitoreo de las MFCs se realizó mediante un sistema de adquisición de datos comprendido de un Arduino 1 y 3 conversores análogos ads1115 I2c, permitió monitorear las fluctuaciones de voltaje que genera cada una de las celdas de combustible microbiana; los datos que se obtuvieron fueron en milivoltios, de tal modo se pudo determinar la generación de energía de las 6 celdas durante 15 días, reflejando al final del monitoreo resultados favorables para las MFCs contenidas con maghemita a comparación de las MFCs que únicamente estaban compuestas por fibra de carbono. Como se refleja en el (gráfico 3-4) el comportamiento la MFC 1-1 generó un voltaje de corriente directa de 152.81mV y la MFC 2-1 un voltaje de 157.92 mV, siendo los valores más bajos en comparación a las demás celdas. Por otra parte, la MFC 1-2 presentó voltaje de 236.18mV y la MFC 2-2 de 258.12 que a comparación de las MFCs contenidas de maghemita con tratamiento térmico, la producción de voltaje fue mayor a diferencia de las primeras, alcanzando picos de 284.74mV en la MFC 1-3 y 286.50 mV en la MFC 2-3.

Durante el monitoreo de las celdas de combustible microbianas se pudo observar que hubo caídas de voltaje regularmente entre los días 5-8 para las celdas: MFC 1-2, MFC 2-2, MFC 1-3, MFC 2-3; esto podría ser causa del proceso de evaporación del sustrato y retiro del mismo para el control diario de pH que se efectuó simultáneamente en todas las MFCs. Los resultados obtenidos, refleja el voltaje que se generó por acción conjunta del sustrato orgánico con las membranas de intercambio protiónico (fibra de carbono- maghemita) y cultivos axénicos como la *Delftia Acidovorans*.

4.3. Prueba de hipótesis

4.3.1. Hipótesis estadística global

$$H_0 = \delta MFC 3 - 1 = \delta MFC 3 - 2 = \delta MFC 3 - 3.$$

$$H_a = \delta MFC 3 - 1 \neq \delta MFC 3 - 2 \neq \delta MFC 3 - 3.$$

H₀ = No existe diferencias significativas entre los tratamientos compuestos de cultivos axénicos.

H_a = Existe diferencias significativas entre los tratamientos.

4.3.2. Análisis de normalidad

Previo a la selección del estadístico paramétrico o no paramétrico, se realizó una prueba de normalidad con los datos establecidos en la (Tabla 11-4), permitiendo comprobar si existe o no una distribución normal de acuerdo al nivel de significancia del $\alpha = 0.05$.

Para realizar comparaciones de medias es importante analizar la normalidad de los datos aplicando un análisis de varianza con el estadístico Fisher, considerando las siguientes hipótesis.

H₀ = No hay diferencias entre las medias de los diferentes grupos: MFC 3-1 = MFC 3-2 = MFC 3-3.

H_a = Al menos un par de medias son significativamente distintas la una de la otra.

Tabla 11-3. Prueba de normalidad

Pruebas de normalidad						
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Voltaje corriente	,093	90	,054	,963	90	,012
Corrección de significación de Lilliefors						

Realizado por: Itzayana, Revelo, 2022(GIDAC).

Según los resultados reflejados en la tabla 11- 4, se puede determinar que el nivel de significancia es mayor que el p-value en el estadístico kolmogorov Smirnov, puesto que este estadístico es adecuado para datos mayores a 50, por lo tanto, se acepta la hipótesis nula estableciendo una distribución normal con 95% de confianza, por tal razón para la comparación de los grupos de membranas de intercambio protiónico, se utilizó una prueba paramétrica (ANOVA).

4.3.3. Comparación de medias

- **Prueba ANOVA**

Se utilizó la prueba ANOVA, para comparar las varianzas entre las medias de las celdas de combustible microbianas compuestas de fibra de carbono, maghemita y maghemita con tratamiento térmico, ayudando a discernir si los resultados cuantitativos obtenidos son significativamente diferentes o semejantes entre sí.

Tabla 12-3. Análisis de varianza con un factor ANOVA

ANOVA					
Medición					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	268707,810	2	134353,905	79,218	,000
Dentro de grupos	147552,044	87	1696,001		
Total	416259,854	89			

Realizado por: Itzayana, Revelo, 2022(GIDAC).

La Tabla (12-4), detalla mediante una prueba ANOVA, que el resultado del p-value, es (<0.05) por lo que se rechaza la hipótesis nula global y se acepta la hipótesis alterna, lo que nos indica que existen diferencias significativas entre los promedios de voltaje, implicando que al menos dos de las medias comparadas son significativamente distintas entre sí, pero no se indica cuáles. Para identificarlas hay que comparar dos a dos las medias de todos los grupos por tal razón se aplica el test de Tukey.

- **Test de Tukey**

El test de Tukey también conocido como Test HSD (Diferencia Honestamente Significativa), se utilizó conjuntamente con la técnica ANOVA, después de haberse rechazado la hipótesis nula para efectuar comparaciones múltiples y evaluar las variables cualitativas, lo que permitió determinar las diferencias significativas entre los tratamientos MFC 3-1; MFC 3-2; MFC 3-3.

Tabla 13-3. Análisis de varianza para comparar múltiples medias

comparaciones múltiples						
Variable dependiente: Medición						
HSD Tukey						
(I) TRATA MIENT O	(J) TRATA MIENT O	Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	S i g .	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
MFC 3-1	MFC 3-2	- 91,7847483 79629590*	10,633282 657577665	, 0 0 0	- 117,139593 816813740	- 66,4299029 42445410
	MFC 3-3	- 130,255046 527777840*	10,633282 657577665	, 0 0 0	- 155,609891 964962000	- 104,900201 090593670
MFC 3-2	MFC 3-1	91,7847483 79629590*	10,633282 657577665	, 0 0 0	66,4299029 42445410	117,139593 816813740
	MFC 3-3	- 38,4702981 48148260*	10,633282 657577665	, 0 0 1	- 63,8251435 85332430	- 13,1154527 10964089
MFC 3-3	MFC 3-1	130,255046 527777840*	10,633282 657577665	, 0 0 0	104,900201 090593670	155,609891 964962000
	MFC 3-2	38,4702981 48148260*	10,633282 657577665	, 0 0 1	13,1154527 10964089	63,8251435 85332430

Realizado por: Itzayana, Revelo, 2022 (GIDAC).

Como se muestra en la tabla 13-4, la diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05 por tanto, los resultados denotaron que los grupos MFC 3-1; MFC 3-2; MFC 3-3 son totalmente diferentes, respecto a los resultados de voltaje generados en cada una de las celdas de combustibles microbianas.

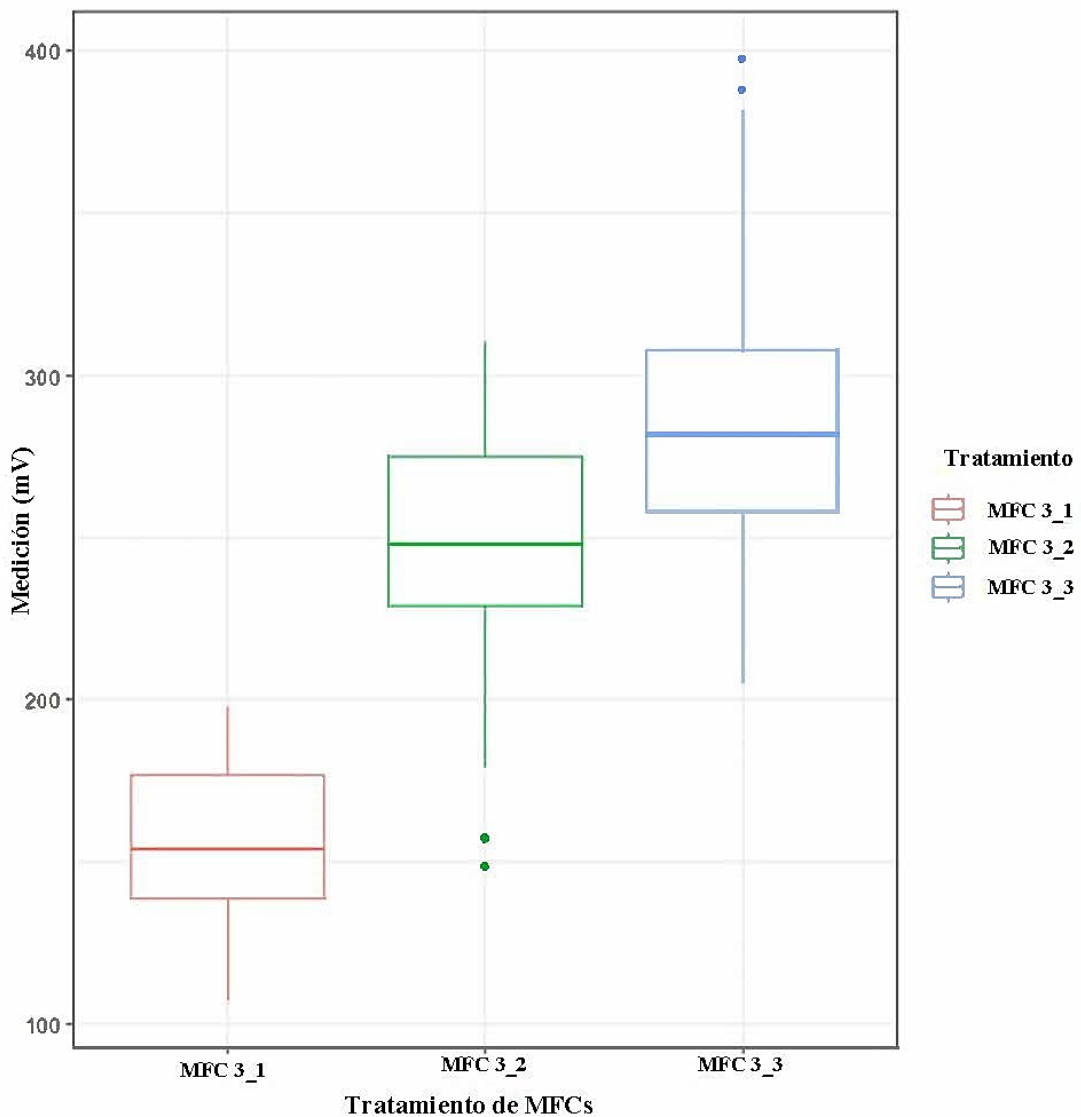


Gráfico 3-4. Diagrama de cajas de las MFCs

Realizado por: Itzayana, Revelo, 2022 (GIDAC).

El diagrama de cajas que se detalla en la (gráfica 4-4), refleja una diferencia significativa entre los tratamientos MFC 3-3 y MFC 3-2 en comparación con la MFC 3-1; es decir que al comparar el nivel de producción de voltaje de la membrana de fibra de carbono con las de maghemita y maghemita con tratamiento térmico, las dos últimas membranas compuestas por el mineral, resultaron con una mayor producción de bioelectricidad. No obstante, al comparar la MFC 3-2 y MFC 3-3 se evidenció una similitud en la generación de voltaje, estableciendo que ambos tratamientos podrían utilizarse bajo el mismo fin, ya que no presentaron diferencias significativas.

4.4. Discusión

En esta investigación el uso de nanopartículas de maghemita y Bacteria *Delftia Acidovorans*, en celdas de combustible microbianas se ha utilizado como material sintético para mejorar la producción de bioelectricidad. Según (Vu et al., 2022, pp.3), determina que la morfología microbiana del modelo con nanopartículas de maghemita muestra la transferencia de electrones interespecíficas entre bacterias, formando biopelícula electroactivas. Así mismo, estudios realizados por Espín (2021) permitieron reconocer que las diferentes variaciones en los electrodos y los reactores pueden tener un importante efecto en el poder de salida, el crecimiento bacteriano y la eficiencia de remoción, enfocado principalmente en que las variaciones de las membranas pueden favorecer a la remoción simultanea de carbono y nitrógeno en las celdas. Adicionalmente, para Rivas (2022) las redes bacterianas eléctricamente conductoras demostraron que coloides generados a partir de óxidos de hierro pueden incrementar la generación de corriente en un ambiente bacteriano. Bajo este criterio se determinó que las MFCs al ser sintetizadas con nanopartículas de maghemita, aportó en el desempeño de la celda por su composición de cloruros de hierro, incrementando el paso de electrones (Liu et al., 2018, pp. 382-388). Conforme a estudios realizados por (Liu et al 2018, pp. 382-388) en el cual se empleó maghemita en la cámara anódica, obteniendo valores de 642mV, se pudo constatar que los voltajes generados en el presente estudio son menores debido al diseño de su MFC que en tamaño es superior. En el presente estudio el mejor resultado de producción de bioelectricidad fue con un voltaje de hasta 286.50mV para MFCs compuesta de maghemita con tratamiento térmico. La diferencia en cuanto a la generación de bioelectricidad podría deberse a una adecuada purificación en el proceso de síntesis de nanopartículas de maghemita, el modo de operación de celdas o por falta de instrumentos que impida comprobar la obtención de maghemita. Se evaluó el potencial electrogénico de una membrana de intercambio de electrones en MFCs, utilizando también como sustrato biomasa orgánica, que a través de análisis físico-químicos, se obtuvieron porcentajes de remoción de N-NH₄, DQO y DBO, con el propósito de mejorar la producción de bioelectricidad mediante la optimización de las configuraciones del sistema y los materiales. Para Álvarez et al. (2021), múltiples investigaciones basados en la generación de bioelectricidad a través de residuos orgánicos han sido diferentes, teniendo porcentajes de remoción altos o bajos en contraste con los resultados obtenidos en esta investigación. Para Martínez (2019) demuestra que si se inocula en una misma MFC más de una especie de bacteria se obtiene valores más altos de voltaje a comparación del uso de un cultivo axénico. No obstante, la remoción de materia orgánica fue similar para MFCs contenidas de maghemita y maghemita con tratamiento térmico, siendo en el mejor de los casos la producción de bioelectricidad en la MFC 2-2 compuesta de maghemita con tratamiento térmico.

CONCLUSIONES

- Se ensamblaron 6 cámaras: 2 con membrana compuesta de fibra de carbono, 2 con membrana de maghemita y 2 con maghemita con tratamiento térmico; de las cuales, las que contenían nanopartículas de maghemita permitió el incremento de electrones y producción de bioelectricidad por su alusión a su magnetismo y composición a diferencia del tratamiento contenido únicamente por fibra de carbono. Las MFCs de estructura simple, compuesta de una cámara anódica y catódica estuvieron contenidas bajo un mismo sistema, donde el cátodo está parcialmente expuesto al aire, generando relaciones intraespecíficas e interespecíficas entre las membranas de intercambio protónico.
- El monitoreo de bioelectricidad que se realizó en las MFCs, fue durante 15 días, y se recolectó datos cada 60 segundos, de los cuales los tratamientos con maghemita y maghemita con tratamiento térmico, no presentaron diferencias significativas, pero si hubo diferencias al comparar con el tratamiento solo con fibra de carbono al mostrar una producción de voltaje mucho menor a las membranas mencionadas anteriormente.
- La producción de bioelectricidad en las celdas con nanopartículas de maghemita demostró su alta eficiencia en la transferencia de electrones y degradación de contaminantes a partir de la acción bacteriana, debido a que sirvieron de redes conductoras adicionales en las MFCs, favoreciendo totalmente al desempeño de la producción bioeléctrica, convirtiéndose en una aportación importante para nuevas investigaciones de desarrollo energético, escalable a un modelo de utilidad.

RECOMENDACIONES

- Para futuras investigaciones experimentales, se recomienda la implementación de un reactor de membrana de doble cámara en celdas de combustible microbianas; con el fin de identificar cómo varía la producción de energía eléctrica en un reactor con cámara simple a comparación de una de cámara doble en función del tratamiento implementado.
- Es necesario considerar durante el proceso de inoculación el uso de cultivos múltiples; con el objetivo de conocer, si la asociación de bacterias electrogénicas generan mayor bioelectricidad en las celdas de combustibles microbianas.
- Se sugiere que en la construcción de MFCs, se contemple la idea de ser llevado a macroescala con la finalidad de comprender las limitaciones ocurridas en el escalamiento; ya que, podría presentar nuevos desafíos o limitaciones en la investigación.

BIBLIOGRAFÍA

ÁLVAREZ, Jimena; et al. "*Generación de bioelectricidad usando bacterias*". *RINDERESU*, vol. 6, (2021), pp. 326-335.

AMAGUAYA, Edison. Diseño de un sistema biológico para la depuración de lixiviados generados en el relleno sanitario de Porlón. Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2019.

ARENALES, Sheyla. "Diseño y fabricación de un sistema de celdas de combustible microbianas para su posible uso doméstico". *Jóvenes en la ciencia*, 2021, Vol. 10.

ARGOTI, Ana. Identificación de microorganismos de suelo de páramo alto andino potencialmente electrogénicos para producir bioelectricidad. Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2019. UDCTFC;236T0470.

BAHAMONDE, Raúl & DUCHE, Tania. Últimos avances en el tratamiento de aguas residuales de la industria alimenticia con celdas de combustible microbianas. Quito : Universidad Central del Ecuador, 2021.

BEJERANO, Javier; et al. "Estimación del caudal medio de lixiviados generados en el vertedero de Viñales", *Pinar del Río*, vol. 22, (2020), , pp. 325-341.

BONETTO, María; et al. "Biosensores y celdas de combustible microbianas". *Ciencia con texto*. Vol. 1, (2018), (Buenos Aires): Instituto CEFIEC, pp. 1-7.

BONILLA DEL POZO, Jhonn. Valoración de sustratos vegetales, nitratos y plomo para maximizar la producción de bioelectricidad en celdas de combustible microbiano. Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2018.

BUÑAY, Paúl & SANUNGA, Luis. Diseño y construcción de una celda de combustión microbiana (CCMs). Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2019.

CASTILLO, Marcela; et al. "*Estudio del comportamiento energético de una celda de combustible microbiana escalada a 20 L*". *Altamira: Transversalidad científica y tecnológica*, vol. 2 (2018), pp. 178-189.

CELI, Félix. "Nitrógeno amoniacal en aguas residuales domesticas utilizando sedimentador primario con diferentes condiciones hidráulicas, marcara 2019". *Revista Científica Multidisciplinar*, vol. 5, (2021), pp. 4296-4310.

CHACÓN, R. Tratamiento de aguas residuales y producción de hidrógeno con un sistema bioelectroquímico asistido con dos diferentes membranas (Trabajo de titulación, Maestría). (Chihuahua- México). 2018.

CHINCHÍN, Billy. Modificación de membranas bioinspiradas en el mejillón para celdas de combustible microbianas (MFCs) en el tratamiento de aguas residuales de la industria textil. Quito : Universidad Central del Ecuador, 2020.

CIMADEVILLA, José & CARVAJAL, María. *Introducción a los fundamentos biológicos de la conducta: Libro de prácticas.* España : Universidad Almería, 2020. 978-84-1351-023-1.

CONDORI, Araceli & TORRES, Gustavo. *Biodegradación de la materia orgánica y producción de Bioelectricidad en Celdas de Combustible Microbiano (CCM) a partir del agua residual doméstica–Lima.* Lima : Universidad Peruana Unión, 2019.

DE SANTANA, Mayco; et al. "Influência do uso de inóculo na estimativa de gás metano dos resíduos orgânicos do aterro sanitário dos municípios do agreste alagoano". *Research, Society and Development*, vol. 10, (2021), , pp. 1-11.

DHARMALINGAM, S.; et al. *Membranes for Microbial Fuel Cells: In microbial Electrochemical Technology*, 2019.

DUCHE, Tania. Últimos avances en el tratamiento de aguas residuales de la industria alimenticia con celdas de combustible microbianas. Universidad Central del Ecuador. (Quito) 2021.

ESPÍN, Marco. "Producción de oxihidrógeno como alternativa energética". *Revista Perspectivas*, Vol. 3, (2021), , pp. 62-67.

FERNÁNDEZ, Antonio; et al. *Aplicaciones medioambientales y energéticas de la tecnología electroquímica.* Barcelona: Reverte, 2021. 978-84-291-9606-1.

GALLEGO, Alejandrina. *Química básica.* Madrid: Editorial UNED, 2018. pp. 50. 978-94-362-

7496-7.

GÓMEZ; et al. 2005. *Interpretación de procesos redox en suelos sulfatados ácidos del distrito de riego del Alto Chicamocha.* Boyacá, Colombia : s.n., 2005. págs. 136-142.

GUAMBO, Alex, et al. Beneficios de un microorganismo de suelo Andino para la producción de energía renovable usando nitratos como compuesto inorgánico. Riobamba: Congreso Internacional I+D+I Sostenibilidad energética, 2018.

HERNÁNDEZ, Estela; et al. "La electricidad y la electrónica como base para la electrofisiología y la biofísica de membranas". *Archivos de Neurociencias*, vol. 21, (2018), pp. 22-35.

HERNÁNDEZ, Roberto; et al. 2014. *Metodología de la investigación.* México: McGraw-Hill. 6. ed., 2014.

INEC. Estadística de Información Ambiental Económica en Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales. . Quito : INEC, 2019.

JARAMILLO, María; et al. "Reutilización de las aguas residuales municipales como estrategia de prevención y control de la contaminación hídrica. Caso de estudio: Cuencas de los ríos Bolo y Frayle". *Colombia: Ingeniería y competitividad*, Vol. 22, (2020), , pp. 1-12.

JATOI, Abdul; et al. "Advanced microbial fuel cell for waste water treatment-a review". *Environ Sci Pollut Res*, vol. 28, (2020).

JIMÉNEZ, Maxwell; et. al. "Modelo bioquímicamente estructurado para la estimación de la eficiencia de una celda de combustible microbiana". *Revista internacional de contaminación ambiental*, vol. 34, 2018, pp. 331-345.

LIU, P.; et.al. *Stimulated electron transfer inside electroactive biofilm by magnetite for.* Applied Energy, 2018. pp. 382-388. ISSN 03062619.

LLONTOP, Edgard; et al. "Influencia de los niveles de demanda bioquímica de oxígeno (DBO) de las aguas residuales crudas con la cantidad de energía eléctrica utilizando celdas de combustible microbiana". *Lambayeque: Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo*, 2018

LOGROÑO, Washington.; et al. "Bioconversión de Residuos Sólidos Orgánicos con Suelos de la región Amazónica y Alto Andina del Ecuador en Celdas de Combustible Microbiano de Cámara Simple". *Información Tecnológica* [en línea], 2014. (Ecuador). 26(2), 61-68.
doi:10.4067/S0718-07642015000200008

LÓPEZ, María; et al. "Predicción de la generación de lixiviados en rellenos sanitarios de Residuos Sólidos Urbanos en la ciudad de Santa Clara Cuba". *Tecnología Química*, Vol. 41, (2021), pp. 47-59.

MANTELL, C. *Ingeniería electro-química*. España: Reverte, 2021. 978-84-291-7940-8.

MARTÍNEZ, Eloi. *Modelo bioelectroquímico del cátodo de una celda de combustible microbiana*. Barcelona: Universitat Autònoma de Barcelona, 2019. pp. 520-527.

MAZO, Majorie. Identificación molecular de bacterias electrogénicas a partir de la biopelícula anódica de celdas de combustible microbiana para la producción de bioelectricidad (Trabajo de titulación). Riobamba, 2020. pp. 24-37.

MEDINA, Mariela. Energía alternativa a partir de la bacteria *Pseudomonas Aeruginosa* y *Aeromonas Hydrophila* por la técnica de la Bioelectrogénesis. Perú: Universidad César Vallejo, 2018.

MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS. *Energía, sociedad y ambiente*. Shushufindi: Ministerio de Energía y Minas, 2022.

MINISTERIO DE ENERGÍA Y RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES. *Balance Energético Nacional*. Quito : Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables, 2020.

MORA, Alexander & BRAVO, Enrique. "Evaluation of the Electrogenic Potential of Coastal Sediments of La Azufrada Beach, Gorgona Island". *Cali Universidad del Valle*, vol 21, (2018), pp. 11-19.

NAKAMURA, R.; et.al. "Self-Constructed Electrically Conductive Bacterial Network". *Angew. Chem*, (2009), pp. 508-511.

NASTAR, Jhon. "Producción de bioelectricidad en celdas en serie de combustible microbiano a

partir de fango del estero salado (Guayaquil)". Guayaquil : Universidad Agraria de Guayaquil, 2020.

PLASENCIA, Claudia. "Evaluación del potencial energético de residuos de cacao (*Theobroma cacao* L.) por medio de celdas de combustible microbiano (CCM)". *Información tecnológica*, vol. 32, (2021), pp. 89-98.

POSADA, María. *Operaciones básicas de laboratorio*. España: Ediciones Paraninfo S.A. , 2022. 978-84-1366-511-5.

REPUELLO, Braulio; et. al. "Generación de energía eléctrica y tratamiento de aguas residuales municipales utilizando celdas de combustible microbiano (MFC) en la ciudad de Huancavelica". *South Sustainability*, vol. 1, (2020) (Perú), pp. 1-17.

RIVAS, Jomayra. *Caracterización molecular de cultivos axénicos para el tratamiento de lixiviados mediante Celdas de Combustible Microbianas*. Riobamba : Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2022. pp. 1-9.

ROBLEDO, Sany; et. al. "Microorganismos como fuente de energía alternativa". Bbahoyo: *RECIMUNDO*, vol. 4, (2020), pp. 161-173.

RODRÍGUEZ, Claudia. Adaptación de un inóculo fijador de nitrógeno electrogénico en una celda de combustible microbiana (Tesis de maestría) (Ingeniería en Sanitaria y Ambiental.). Universidad del Valle. (Cali):, 2018.

ROSERO, Karla. "Humedales artificiales y celdas de combustibles microbianas como sistemas individuales y combinados para el tratamiento de aguas residuales: una revisión". *infoANALÍTICA*, vol. 7, (2019), pp. 15-37.

SALAZAR, Ericka. "Almidón resistente en la nutrición de animales monogástricos I: concepto, clasificación y fuentes". *Nutrición Animal Tropical*, vol. 12, (2018), pp. 55-69.

SÁNCHEZ, Mireya; et. al. "Generación de energía eléctrica y tratamiento de aguas residuales mediante celdas de combustible microbianas". *Revista Digital Novasinergia*, vol. 4, 2021, pp. 164-180.

SÁNCHEZ, Gloria & LUJÁN, Adriana. *Revisión sistemática–eficiencia de humedales artificiales en el tratamiento de lixiviados generados en la planta de residuos sólidos, Cajamarca-2020.* Perú : Universidad Privada del Norte, 2021.

SETTE, Rubens. *Tratamiento de aguas residuales.* Barcelona : Reverte, 2021. 978-84-291-9207-7.

TITO, Carlos. *Generación de electricidad a través de microorganismos en los sedimentos de humedales, Ite-Tacna.* Perú : Universidad Nacional Jorge Basadre Grohman , 2018.

TIWARI, Tuhina & SRIVASTAVA, Neelam. "Exploring the Possibility of Starch-Based Electrolyte Membrane in MFC Application". *Macromolecular Symposia*, vol. 309, (2019), , pp. 1-12.

VARGAS, Alejandro. "Saccharomyces Cerevisiae como biocatalizador en celdas de combustible microbianas con ferricianuro de potasio". *Revista Boliviana de Física*, Vol. 33, (2018), pp. 21-26.

VILLARROEL, Pía. "Almidón resistente: Características tecnológicas e intereses fisiológicos". *Revista chilena de nutrición*, vol. 45, (2018), pp. 271-278.

VU, Thi Mung. *Magnetite/zeolite nanocomposite-modified cathode for enhancing methane generation in microbial electrochemical systems.* Republica de Corea : Department of Environmental Science and Engineering,, 2022. ISSN 1385-8947,.

WEBER, Walter. *Control de la calidad del agua: Procesos fisicoquímicos.* Barcelona : Reverte, 2021. 978-84-291-9199-8.



ANEXOS

ANEXO A: Aval de Investigación



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

"Saber para Ser"



CERTIFICADO

A QUIÉN CORRESPONDA:

El Grupo de Investigación y Desarrollo para el Ambiente y Cambio Climático GIDAC – ESPOCH, Certifica Que: Lady Itzayana Revelo Rodríguez con CI: 092295614-9 estudiante de la carrera de Ingeniería en Biotecnología Ambiental, desarrollará el Trabajo de Titulación denominado: **“Evaluación del potencial electrogénico de una membrana de intercambio de electrones para una celda de combustible microbiana en el tratamiento de lixiviados”**, mismo que forma parte del Proyecto de Investigación IDIPI-273: “Opportunities and challenges of renewable energies as a territorial development in zones of the province of Chimborazo”

Este trabajo es de interés, tanto investigativo como aplicativo y contribuirá a la consecución de los objetivos propuestos en el mencionado proyecto; razón por el cual se otorga el **AVAL DE APROBACION** para la realización de las diferentes actividades y el apoyo técnico necesario y disponible que así requiera la estudiante.

Cabe mencionar que el patrimonio intelectual de los resultados que se obtengan del trabajo de titulación pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 15 de Junio de 2022

Atentamente,



Firmado electrónicamente por:
**MAGDY MILENI
ECHEVERRIA
GUADALUPE**

Dra. Magdy Echeverría PhD
DIRECTORA GIDAC-ESPOCH

ANEXO B: Análisis Físico-Químicos Iniciales



Fecha: 26 de octubre del 2022
Análisis solicitado por: Srta. Lady Revelo
Tipo de muestra: Lixiviado de residuos orgánicos (Frutas y Verduras 1:1).
Localidad: Mercado Mayorista EP-EMMPA San Pedro de Riobamba

Análisis Químico

Determinaciones	Unidades	*Métodos de análisis	Resultados
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	4500-NH ₄ -C	365.0
Demanda Química de Oxígeno	g/L	5220-D	101.5
Demanda Bioquímica de Oxígeno	g/L	5210-B	96.0

* Métodos de análisis del Standard Methods APHA AWWA.

Observaciones:

Atentamente,



Dra. Gina Alvarez R.
RESPONSABLE TECNICO LABORATORIO

Avenida 9 de Octubre # 12 y Madrid
Contáctanos: ☎0998580374 ☎032 942 322
Saqmic Laboratorio
Riobamba - Ecuador





esPOCH

Dirección de Bibliotecas y
Recursos del Aprendizaje

**UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO Y
DOCUMENTAL**

REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 24 / 03 / 2023

INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)
Nombres – Apellidos: Lady Itzayana Revelo Rodríguez
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: Ciencias
Carrera: Ingeniería en Biotecnología Ambiental
Título a optar: Ingeniera en Biotecnología Ambiental
f. Analista de Biblioteca responsable: Ing. Rafael Inty Salto Hidalgo

0503-DBRA-UPT-2023

