

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA



Sistema Bioelectroquímico para Remover Materia Orgánica del Agua Residual del Rastro

TIF 377

Por:

AZAEEL MOLINA ALMARAZ

Tesis

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México

Diciembre 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

Sistema Bioelectroquímico para Remover Materia Orgánica del Agua Residual
del Rastro TIF 377

Por:

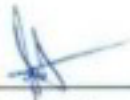
AZAZEL MOLINA ALMARAZ

Tesis

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA

Aprobado por el Comité de Asesoría.



Dra. Silvia Yudith Martínez Amador
Asesor Principal Interno



Dr. José Antonio Rodríguez de la Garza
Asesor Principal Externo



Dr. Pedro Pérez Rodríguez
Coasesor



Dra. Aida Isabel Leal Robles
Coasesor

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA

Sistema Bioelectroquímico para Remover Materia Orgánica del Agua Residual
del Rastro TIF 377

Por:

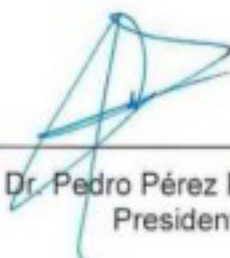
AZAEEL MOLINA ALMARAZ

Tesis

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA

Aprobado por el Jurado Examinador.



Dr. Pedro Pérez Rodríguez
Presidente



Dra. Silvia Yudith Martínez Amador
Vocal



Dra. Aida Isabel Leal Robles
Vocal



Dr. José Antonio Rodríguez de la Garza
Vocal



M.C. Sergio Sánchez Martínez
Coordinador de la División de Ingeniería

Saltillo, Coahuila, México

Diciembre 2025

DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

Todo material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor de los Estados Unidos Mexicanos, y pertenece al autor principal quien es el responsable directo y jura bajo protesta de decir verdad que no se incurrió en plagio conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos.

Reproducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (corta y pega); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (auto plagio); comprar, robar o pedir prestados los datos o la tesis para presentarla como propia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin usar comillas; utilizar ideas o razonamientos de un autor sin citarlo; utilizar materia digital como imágenes, videos, ilustraciones, gráficas, mapas o datos sin citar al autor original y/o fuente. Así mismo tengo conocimiento de que cualquier uso distinto de estos materiales como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor. Por lo anterior nos responsabilizamos de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaramos que este trabajo no ha sido previamente presentado en ninguna otra institución educativa, organizacional, medio público o privado.

Autor principal

Asesor principal


Azrael Molina Almaraz

Nombre y firma


Dra. Silvia Judith Martínez Anadón

Nombre y firma

INDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	7
AGRADECIMIENTOS	8
DEDICATORIA	9
INTRODUCCIÓN	10
OBJETIVO GENERAL	12
HIPÓTESIS	12
CAPÍTULO I	13
MARCO TEÓRICO	13
1.1. ¿Qué es el agua residual del rastro?	13
1.2. Tipos de tratamiento de aguas residuales.....	14
1.2.1. Tratamiento Terciario o Biológico.....	15
1.3. Sistema bioelectroquímico.....	17
1.4 Filtro de grafito en los sistemas bioelectroquímicos.....	18
CAPÍTULO II	20
MATERIALES Y MÉTODOS	20
2.1. Localización geográfica del sitio	20
2.2. Materiales, Reactivos y Equipos	20
2.3. Metodología	21
2.3.3 pH.....	25
2.3.4 Conductividad eléctrica.....	26
CAPÍTULO III	30
RESULTADOS Y DISCUSIONES	30
CONCLUSION	34
BIBLIOGRAFÍA	35

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema general de funcionamiento del proceso aerobio.....	16
Figura 2. Esquema general del proceso anaerobio.....	17
Figura 3. Representación esquemática de una celda de combustible microbiana	18
Figura 4. Representación esquemática de un sistema bioelectroquímico con ánodo y cátodo de fieltro de carbono.....	19
Figura 5. Ensamblaje del sistema bioelectroquímico trabajado en este proyecto.....	21
Figura 6. Sistema bioelectroquímico en operación.....	22
Figura 7. Los electrodos fueron acondicionados en ambientes anaerobio (carente de oxígeno) y aerobio (con presencia de oxígeno) para obtener los inóculos correspondientes al ánodo y al cátodo.....	23
Figura 8. Comportamiento del pH en el sistema bioelectroquímico.....	31
Figura 9. Porcentaje de remoción de la DQO en el SBE y temperatura registrada entre los meses de abril a junio del 2022.....	32
Figura 10. Generación de voltaje en SBE y porcentaje de eficiencia de remoción de la DQO entre los meses de abril a junio del 2022.....	33
Figura 11. Conductividad de influente y efluente registrada en los días de monitoreo..	34

RESUMEN

El trabajo se llevó a cabo en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, ubicada en Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. Para la producción de energía se hizo uso de una celda de combustible microbiana (CCM) a nivel experimental. Se diseñó y construyó un sistema bioelectroquímico compuesto por dos compartimentos de policarbonato, cada uno con un volumen útil de 2000 mililitros. En ambos electrodos, ánodo y cátodo, se utilizaron electrodos de fieltro de grafito, separadas por una membrana selectiva (CMI-7000). En el ánodo se inocularon microorganismos anaerobios, mientras que en el cátodo se incorporaron microorganismos aerobios. Antes de iniciar el experimento, los electrodos se mantuvieron en contacto con agua residual de rastro durante 15 días para favorecer la formación de una biopelícula microbiana adaptada a este tipo de influente. El agua residual recolectada en ese periodo presentó un pH promedio de 9.0, y el efluente tratado mostró un pH medio de 8.6. Durante el desarrollo de la tesis, el agua residual utilizada contenía aproximadamente 4.8 g DQO/L. El tratamiento alcanzó una eficiencia promedio de remoción de DQO del 73%. En cuanto a la producción eléctrica, se obtuvo un voltaje medio de 104 mV, con un máximo registrado de 331.5 mV y un mínimo de 7.56 mV. La conductividad del influente promedió 4.75 mS/cm, con un valor máximo de 6.56 mS/cm, mientras que el efluente presentó un promedio de 4.70 mS/cm y un valor máximo de 8.7 mS/cm. Este tipo de sistemas ofrece un gran potencial tanto para la generación de energía como para la degradación de materia orgánica.

Palabras clave: celda de combustible microbiana, biopelícula, agua residual, DQO, pH, voltaje, conductividad.

Siento una inmensa gratitud por la oportunidad de haber llevado a cabo el desarrollo de esta tesis:

AGRADECIMIENTOS

Para con Dios por brindarme la vida, salud y la oportunidad de haber participado en este proyecto y en los que están por venir

Para con la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro por haberme prestado sus servicios, así como la posibilidad de compartir experiencias con estudiantes y docentes que enriquecieron mi desarrollo personal y profesional a lo largo de toda mi estancia.

Para con mis profesores por su pasión por transmitir sus conocimientos, dar el apoyo y cultivar buenos profesionistas.

Para con la Dra. Silvia Yudith Martínez Amador, por el conocimiento que adquirí durante las distintas asignaturas que impartió, así como el apoyo que me ha dado durante mi estancia en la Universidad, por la oportunidad de participar en sus proyectos de servicio social y tesis.

Para los coasesores por tener siempre la disposición de aclarar las dudas y de compartir sus conocimientos.

Para Yulen Mayorga, Leonardo Gonzalez y Brayan Amaya por su amistad incondicional, haberme brindado su apoyo desde que entre a la universidad y habernos ayudado mutuamente y adquirir más conocimientos.

DEDICATORIA

A mis padres Ma. de los Ángeles Almaraz Rodríguez. y Armando Molina Esquivel, por los valores que han inculcado a lo largo de mi vida poniéndome el ejemplo, por el apoyo incondicional que me han brindado en cada decisión que he tomado, por ser los mejores mentores que he tenido, la fe que han puesto en mí y por los sacrificios que han hecho para darme una carrera y pueda tener un buen futuro les dedico este trabajo.

A mi abuelita, Ma. Isabel Rodríguez Pérez quien también contribuyo en mi formación y en la persona que ahora soy, por las innumerables risas y recuerdos gratos a lo largo de mi vida también le dedico este trabajo a usted hasta el cielo.

A mi hermano Armando Molina Almaraz, quien siempre se esfuerza por cumplir sus objetivos y de quien espero que algún día alcance a ser una persona llena de éxitos.

INTRODUCCIÓN

Ante la creciente problemática relacionada con la escasez de agua y el uso inadecuado de este recurso en distintos sectores de la sociedad, han surgido diversas investigaciones cuyo propósito central es tratar las aguas residuales. Estas iniciativas buscan reducir los niveles de contaminación y generar los beneficios ambientales asociados a su adecuado manejo. (Elkhatib *et al.*, 2015).

La naturaleza del agua residual producida en un matadero o varía principalmente según las especies animales que se procesan en el lugar. En términos generales, estos efluentes presentan altas concentraciones de sólidos, grasa, sangre, estiércol y diversos compuestos orgánicos. Las actividades que más contribuyen a la contaminación del agua incluyen el alojamiento de los animales, el sacrificio, la remoción de piel y pelo, el manejo de vísceras, el lavado de la canal, el corte y las labores de limpieza. La correcta gestión de estas aguas ha adquirido gran relevancia debido a las estrictas normas que regulan la calidad de los efluentes. El volumen de agua residual producido en un rastro está estrechamente ligado al consumo de agua durante las operaciones. Algunos estudios indican que entre el 80% y el 95% del agua utilizada termina desechándose; no obstante, otras investigaciones elevan esta cifra a entre el 97% y el 100%, al incluir como desecho tanto el agua residual que se volatiliza, similar a la utilizada en la producción de derivados (Elba *et al.*, 2012).

Se ha comprobado que las celdas de combustible microbianas (CCM) pueden emplearse para generar bioenergía —como electricidad, metano e hidrógeno— durante el tratamiento de aguas residuales. Estas celdas funcionan como dispositivos electroquímicos capaces de transformar la energía bioquímica en energía eléctrica, utilizando microorganismos que actúan como biocatalizadores de la materia orgánica biodegradable. (Revelo *et al.*, 2013). En esta tesis se implementó una celda de combustible microbiana (CCM) estructurada en dos compartimentos y equipada con dos electrodos de fieltro de grafito: un ánodo y un cátodo. Sobre el ánodo se desarrolló una biopelícula microbiana que degrada los sustratos energéticos, produciendo CO₂, protones y electrones. En el cátodo, conectado por un circuito externo, los electrones se acoplan con los protones

y se reducen dando lugar a agua, liberando energía eléctrica gracias al gradiente electrónico. (Torres-Zamata *et al.*, 2020).

OBJETIVO GENERAL

Analizar el grado de eliminación de la materia orgánica e inorgánica presente en el agua residual del rastro utilizando un sistema bioelectroquímico equipado con electrodos de fieltro de grafito.

HIPÓTESIS

El sistema bioelectroquímico equipado con electrodos de fieltro de grafito favorecerá la eliminación de la materia orgánica presente en el agua residual del rastro

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1. ¿Qué es el agua residual del rastro?

En México continúa practicándose el manejo y sacrificio de animales. La carne destinada al consumo humano se obtiene en instalaciones especializadas conocidas como rastros o mataderos. Estos establecimientos se encargan de asegurar y ofrecer productos cárnicos con la calidad necesaria para su comercialización y consumo (Vallejo-Rodríguez *et al.*, 2019).

Los mataderos pueden clasificarse en municipales y en aquellos que operan bajo distintos esquemas de gestión, infraestructura y nivel técnico, como los rastros municipales y los rastros Tipo Inspección Federal (TIF). Los primeros suelen ser administrados y operados por la propia comunidad productora de carne en canal, destinada a su venta en negocios locales como carnicerías y talleres. Por su parte, los rastros TIF funcionan como empresas especializadas que generan ingresos mediante la venta de piezas, cortes y productos cárnicos —incluidos embutidos— dirigidos a consumidores más exigentes, al sector gourmet o al mercado de exportación. En ambos casos, la instalación, operación y funcionamiento deben cumplir con procedimientos, requisitos y normativas administrativas, sanitarias y ambientales (Vallejo-Rodríguez *et al.*, 2019).

En México se tienen registrados 1,220 establecimientos dedicados al procesamiento de carne de distintas especies, entre ellos rastros municipales y plantas TIF. La disminución del impacto ambiental es un tema crucial, pues las plantas de tratamiento de agua residual se encuentran únicamente en el 2% del total de estos sitios. Las consecuencias derivadas respecto a esta falta de depuración de aguas incluyen la aparición de plagas, malos olores y afectaciones tanto dentro como en los alrededores de los mataderos. Además, se compromete la calidad ambiental, se incrementan las emisiones de gases de efecto invernadero, se reduce el oxígeno disuelto en los cuerpos de agua donde se vierten los

efluentes y se generan alteraciones significativas en la flora y fauna acuática (Vallejo-Rodríguez *et al.*, 2019).

Las aguas residuales generadas en los rastros o mataderos se distinguen por su elevado contenido de sólidos, grasa, sangre, excretas y diversos compuestos orgánicos. La contaminación hídrica se origina en actividades como el manejo de los animales en los corrales, el sacrificio, la remoción de piel y pelo, el procesamiento de vísceras, el lavado de las canales, el troceo y las labores de limpieza (Serrano-Yáñez *et al.*, 2015).

1.2. Tipos de tratamiento de aguas residuales.

El tratamiento físico o primario tiene como finalidad principal retirar toda la materia gruesa y visible que es arrastrada por el agua. Si estos materiales llegan al medio ambiente, generan problemas principalmente estéticos, y si avanzan hacia etapas posteriores del proceso de depuración pueden ocasionar fallas y complicaciones. En esta fase se busca eliminar los sólidos y desechos presentes en el colector, prevenir obstrucciones causadas por materiales voluminosos y permitir la sedimentación de partículas como arena, que puede dañar los equipos y acumularse en canales o zonas donde interfiera con el flujo. También se remueven grasas, residuos flotantes y espuma que pueden adherirse a superficies y dificultar la reoxigenación del agua, un paso esencial para los procesos biológicos aerobios (Chávez-Vera, 2017).

El tratamiento secundario o fisicoquímico se enfoca en reducir la concentración de partículas suspendidas empleando agentes coagulantes como el sulfato de aluminio, el cloruro férrico, el sulfato ferroso, y polímeros orgánicos como las poliaminas y floculantes como la poliacrilamida. Este proceso contribuye a reducir la turbidez y la DBO, ya que parte de los sólidos suspendidos son de origen orgánico. Además, al ajustar el pH, es posible disminuir la presencia de ciertos microorganismos patógenos, como coliformes y estreptococos. En esta etapa se busca remover los sólidos sedimentables y, de manera integrada, pueden aplicarse operaciones como la decantación primaria, la flotación y otros métodos fisicoquímicos que mejoran la eliminación de sólidos suspendidos y la reducción de la DBO (Chávez-Vera, 2017).

1.2.1. Tratamiento Terciario o Biológico

El tratamiento biológico emplea organismos como plantas y microorganismos. Su funcionamiento consiste en generar condiciones controladas y favorables para su desarrollo, de modo que puedan degradar y disminuir la materia orgánica carbonosa, reducir la DBO y la DQO, transformar el carbono orgánico, llevar a cabo procesos de nitrificación y contribuir a la eliminación y estabilización del fósforo y los lodos (Borges *et al.*, 2012).

Existen dos opciones principales para llevar a cabo el tratamiento de aguas residuales municipales de manera eficaz: los procesos aeróbicos y los anaeróbicos, es decir, aquellos que requieren oxígeno y los que operan en su ausencia. Esta diferencia constituye el principio fundamental para llevar a cabo la depuración biológica del agua y la degradación de los residuos orgánicos fermentables (De la Varga, 2014).

1.2.1.2. Sistema aeróbico

Un ambiente aerobio se presenta cuando la concentración de oxígeno es lo bastante alta para que no limite la velocidad de crecimiento de los microorganismos. En estas condiciones, los microorganismos suelen desarrollarse con mayor eficiencia, ya que el oxígeno actúa como un aceptor de electrones, lo que favorece un alto rendimiento en la formación biomasa proporcional a la cantidad de contaminante degradado. Como resultado de la descomposición aerobia de la materia orgánica, se generan CO₂, H₂O y nueva biomasa microbiana (De la Varga, 2014).

El proceso de lodos activados alcanza su mayor eficiencia cuando se emplea un digestor aeróbico. En este ambiente, al suministrar aire u oxígeno puro, las bacterias oxidan la materia orgánica, transformando una parte en dióxido de carbono y utilizando otra para su propio crecimiento. Este tipo de tratamiento incluye un reactor con aireación artificial, seguido de un sedimentador encargado de separar la biomasa suspendida del agua, tal como se muestra en la figura 1 (De la Varga, 2014).

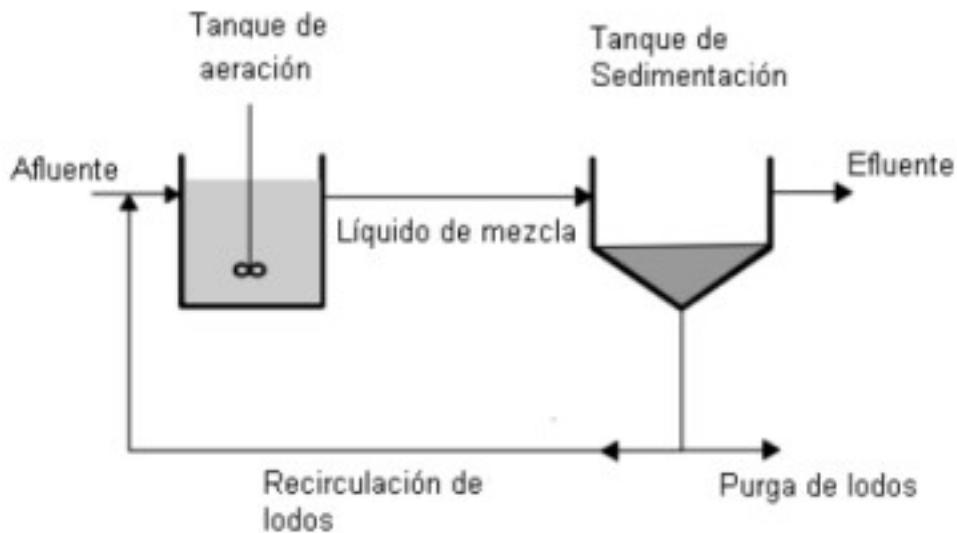


Figura 1. Esquema general de funcionamiento del proceso aerobio (Martínez, 2013).

1.2.1.3. Sistema anaeróbico

Aunque la digestión anaerobia (DA) ha sido una tecnología tradicionalmente empleada para controlar la contaminación, el valor de sus dos subproductos ha incrementado el interés por utilizarla en el aprovechamiento y reciclaje de distintos residuos. El primero, el biogás, posee un alto potencial energético gracias a su elevado contenido de metano (60–70%), lo que permite emplearlo como fuente de calor o combustible. El segundo, el material digerido, tiene un importante valor agrícola, pues puede utilizarse como fertilizante o como mejorador de suelos (Cárdenas-Cleves, 2016).

La digestión anaerobia es un procedimiento bioquímico desarrollado gracias a la acción de diferentes microorganismos que degradan la materia orgánica compleja —como carbohidratos, proteínas y lípidos— transformándola en compuestos más simples, entre ellos azúcares, aminoácidos y ácidos grasos volátiles (AGV) solubles en agua. Como resultado final se genera biogás, constituido principalmente por metano y dióxido de

carbono, además del material digerido, que puede presentarse en forma líquida o sólida, tal como se aprecia en la figura 2 (Cárdenas-Cleves, 2016).

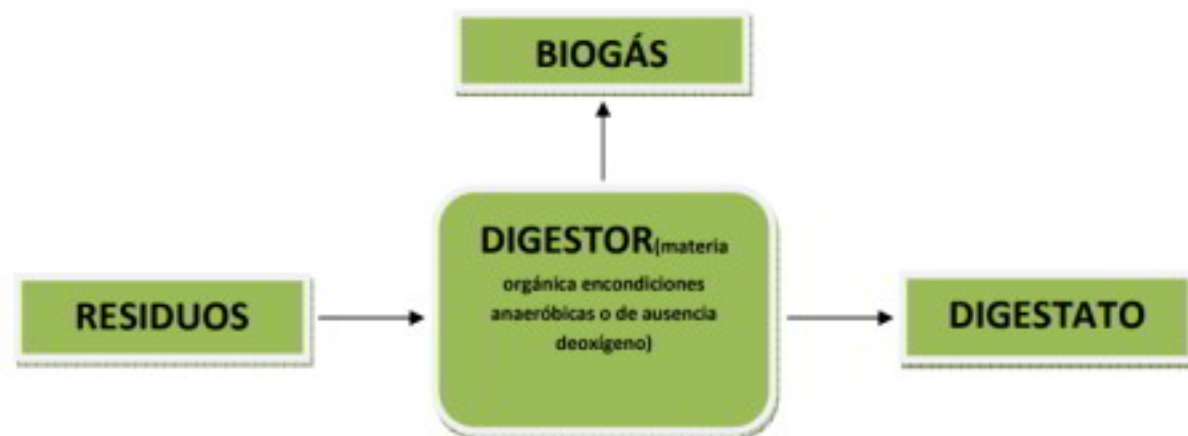


Figura 2. Esquema general del proceso anaerobio (Gonzales- Cabrera, 2014).

1.3. Sistema bioelectroquímico.

Las celdas de combustible microbiano son dispositivos bioelectroquímicos renovables capaces de transformar la energía bioquímica en energía eléctrica. Estos sistemas permiten tratar aguas residuales mientras recuperan energía a partir de mezclas orgánicas, utilizando consorcios microbianos como biocatalizadores. Además de procesar desechos antropogénicos y efluentes, los sistemas bioelectroquímicos generan energía eléctrica en vez de consumirla. También pueden degradar contaminantes tóxicos y presentan la ventaja de no generar una carga adicional al ciclo del carbono, a diferencia de los combustibles fósiles (López- Tirado, 2020).

Los sistemas bioelectroquímicos funcionan gracias a la capacidad de ciertos microorganismos que actúan como catalizadores en distintas reacciones electroquímicas, en especial aquellas relacionadas con el movimiento de electrones, presente en procesos como las reacciones de óxido-reducción (figura 3). Estos sistemas reproducen las

interacciones naturales entre las bacterias y los compuestos que actúan como donadores y aceptores de electrones. (López- Tirado, 2020).

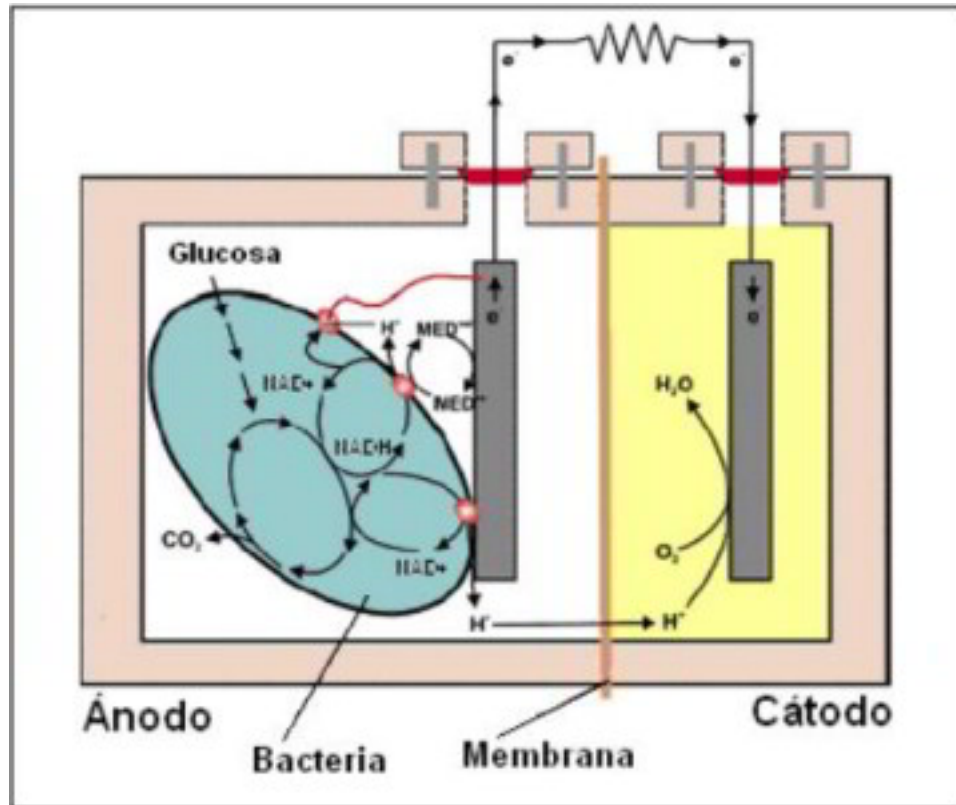


Figura 3. Representación esquemática de una celda de combustible microbiana (López-Tirado, 2020).

1.4 Filtro de grafito en los sistemas bioelectroquímicos.

Los sistemas bioelectroquímicos pueden emplearse tanto para producir electricidad como para remover contaminantes orgánicos. En estos procesos, los materiales utilizados en el ánodo desempeñan un papel clave en el desempeño del sistema, siendo el filtro de grafito uno de los materiales más investigados debido a su eficacia (Liang *et al*, 2020).

La selección del material del cátodo es un aspecto clave en cualquier sistema bioelectroquímico (MFC) que utilice un biocátodo. Entre los materiales más empleados

se encuentran el fieltro de grafito (GF), como se observa en la figura 4, además del papel de carbón (CP) y la malla de acero inoxidable (SSM). (Zhang *et al.*, 2012).

La oxidación ocurre en el ánodo, los electrones producidos se trasladan a través de un conductor externo hacia el cátodo, lugar donde tiene lugar la reducción; juntos, estos procesos conforman una reacción de óxido-reducción. Numerosos microorganismos electrogénicos se encuentran de forma natural en aguas residuales y en frutas en proceso de descomposición. (Rojas-Flores *et al.*, 2020).

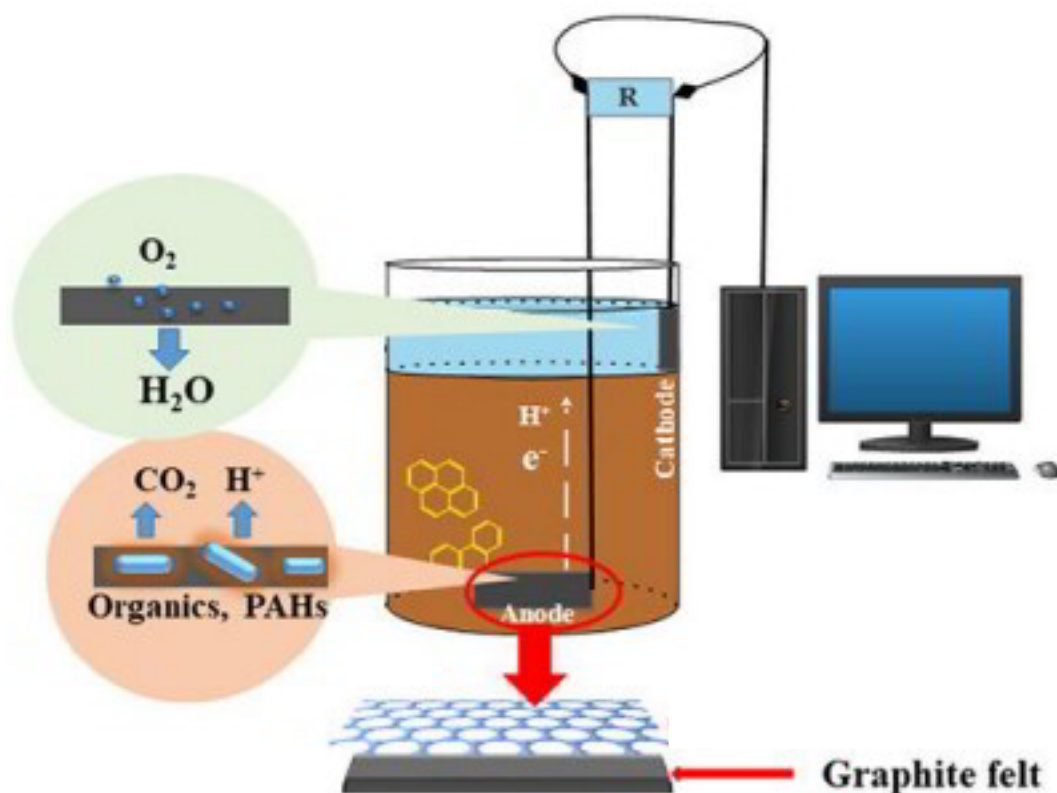


Figura 4. Representación esquemática de un sistema bioelectroquímico con ánodo y cátodo de fieltro de carbono (Liang *et al.*, 2020).

CAPÍTULO II

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Localización geográfica del sitio

Este estudio se realizó en el Laboratorio de Biología del Departamento de Botánica de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, ubicado en Buenavista, Saltillo, Coahuila, México, durante el periodo de abril a junio del 2021.

2.2. Materiales, Reactivos y Equipos

- Ácido sulfúrico
- Agua destilada
- Agua residual de rastro
- Bomba peristáltica
- Dicromato de potasio
- Electrodo fieltro de grafito
- Espectrofotómetro uv-vis (HACH DR 5000)
- Guantes de látex
- Medidor multiparamétrico con electrodos de pH y conductividad de sobremesa Orion Star modelo A215
- Membrana selectiva (CMI-7000)
- Micropipetas de volumen variable
- Multímetro
- Pizetas
- Probetas 100 ml
- Resistencia de 1.5 Ω
- SBE de policarbonato con doble compartimento

- Termoreactor HACH DRB 200
- Tubos Hach con rosca de 10 ml
- Vasos de precipitado de diferentes volúmenes

2.3. Metodología

2.3.1. Diseño y construcción de un SBE

Se desarrolló y montó un sistema bioelectroquímico de doble cámara elaborado en policarbonato, con un volumen operativo cercano a los 2 litros (figura 5). Se utilizaron electrodos de fieltro de grafito para el ánodo así mismo con el cátodo se utilizaron electrodos de fieltro de grafito. Ambos compartimentos quedaron separados mediante una membrana selectiva (CMI-7000

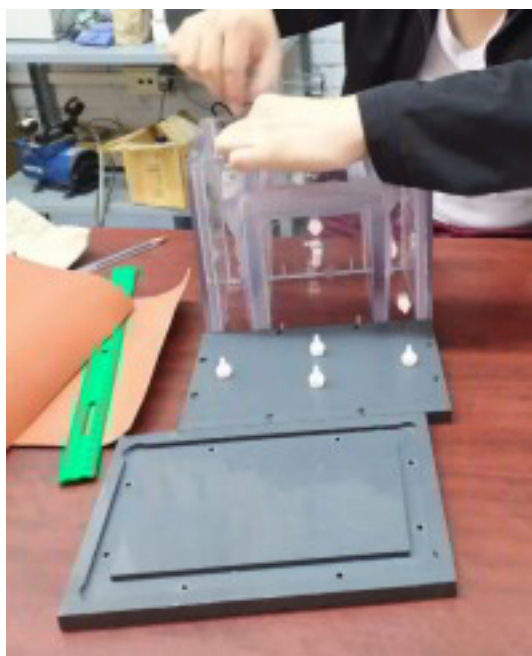


Figura 5. Ensamblaje del sistema bioelectroquímico trabajado en este proyecto.

El sistema bioelectroquímico (SBE) dispone de una entrada para el influente y una salida para el efluente. Fue operado a temperatura ambiente bajo un régimen de alimentación continua, utilizando una bomba peristáltica y con un tiempo de retención hidráulica de 48 horas (Figura 6). Tras la construcción del SBE, se introdujeron microorganismos

anaerobios en el ánodo y aerobios en el cátodo. Luego, se mantuvo el agua residual del rastro en contacto con los electrodos durante un periodo de 15 días, con el objetivo de propiciar la formación de una biopelícula microbiana adaptada a las características de dicha agua residual. (Figura 7).



Figura 6. Sistema bioelectroquímico en operación.



Figura 7. Los electrodos fueron acondicionados en ambientes anaerobio (carente de oxígeno) y aerobio (con presencia de oxígeno) para obtener los inóculos correspondientes al ánodo y al cátodo.

Una vez concluido la etapa de formación de la biopelícula, se procedió a iniciar la alimentación continua del SBE con agua residual proveniente del rastro (influyente), manteniendo un tiempo de retención hidráulica de 48 horas. Tanto el influente como el efluente (agua tratada) fueron sometidos a análisis para determinar su demanda química de oxígeno (DQO), pH y conductividad. En lo siguiente, se describen las técnicas utilizadas para la medición de cada uno de estos parámetros.

2.3.2. Determinación de la demanda química de oxígeno.

La demanda química de oxígeno (DQO) corresponde a la cantidad de oxígeno necesaria para llevar a cabo la oxidación de la materia orgánica e inorgánica contenida en una muestra de agua. Dicho de otro modo, la DQO refleja la proporción de compuestos orgánicos e inorgánicos susceptibles de ser oxidados mediante un agente químico potente. Este parámetro se expresa en miligramos de oxígeno por litro (mg/L).

La oxidación de la materia orgánica se lleva a cabo mediante dicromato de potasio en un medio altamente ácido, con la presencia de catalizadores como Fe^{2+} y Cu^{2+} . Durante el proceso, la solución cambia de un tono amarillo a verde-azulado, registrándose posteriormente a una absorbancia de 620 nanómetros en un espectrofotómetro UV/Vis. Este procedimiento constituye la base para las mediciones en reactores anaerobios y establece las condiciones de operación aplicadas al tratamiento de efluentes industriales y municipales, conforme a la Norma Mexicana NMX-AA-030-SCFI-2012.

Material y equipo

- Digestor Termorregulador HACH DRB/200
- Tubos Hach con tapón de rosca
- Espectrofotómetro HACH DR/2010
- Micropipetas LABMATE SOFT (1/5000) (100/1000) ml
- Frascos ámbar de 1 litro
- Matraces de aforación de 1 litro

- Dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$)
- Sulfato de mercurio ($HgSO_4$)
- Ácido sulfúrico (H_2SO_4)
- Sulfato de plata (Ag_2SO_4)
- Biftalato de potasio ($C_6H_4COOHCOOK$)

Solución de dicromato de potasio.

Solución digestora para altas concentraciones (mayores a 75 mg DQO/L). Secar durante 2 horas a 103 °C, 20 gramos de dicromato de potasio. Enfriar en un desecador y pesar 10.216 gramos de dicromato, pasar este dicromato a un matraz de adoración de un litro y añadirle 500 ml de agua destilada, adicionar 33.3 gramos de sulfato mercúrico ($HgSO_4$), adicionar 167 ml de ácido sulfúrico concentrado lentamente por ser una reacción exotérmica en baño de hielo, por último aforar a un litro con agua destilada cuando la mezcla se haya enfriado, en el caso de que no todas las partículas se hayan disuelto, se mezcla con agitación magnética, para después pasar esta mezcla a un frasco ámbar, ya que puede sufrir una descomposición por la luz.

Solución de ácido sulfúrico plata

Se deben pesar con exactitud 15 gramos de sulfato de plata y transferirlos a un matraz aforado de un litro. Posteriormente, se completa el volumen hasta un litro utilizando ácido sulfúrico concentrado. La solución se deja durante dos días reposar en un sitio resequido y oscuro para asegurar su disolución completa. Finalmente, se transfiere a un frasco ámbar para su conservación.

Procedimiento

1. En un tubo hach añadir 3.5 ml de la solución de ácido plata y 1.5 ml de la solución de dicromato de potasio.
2. Agregar 2.5 ml de la muestra problema, cerrar bien con el tapón de rosca; es necesario realizar un blanco de referencia (agua destilada).

3. Agitar lentamente por inversión. Colocar los tubos en el digestor durante 2 horas a 150°C.
4. Sacar los tubos y dejar enfriar a temperatura ambiente. Leer las absorbancias en el espectrofotómetro a una longitud de onda de 620 nm.
5. Calcular la concentración de la DQO con la curva estándar.

2.3.3 pH

El pH es una medida que refleja la cantidad de iones hidrógeno presentes en una solución, permitiendo estimar su acidez. A menudo, se describe también en función de los iones de hidrógeno hidratados. (Evelin Rivera et al., 2018). La determinación del pH se realizó mediante un potenciómetro Thermo Scientific, modelo Orion Star A215, equipado con un electrodo ORION 8302BN. Para la calibración del equipo se utilizaron soluciones amortiguadoras con valores de pH 4, 7 y 10.

Instrucciones para la medición del pH

Para el correcto uso del potenciómetro se debe preparar el electrodo de acuerdo con las instrucciones del manual del electrodo. Conecte todos los electrodos necesarios a las entradas de medidor apropiadas. Asegúrese de que el sensor se haya calibrado recientemente y funcione correctamente.

Asegúrese de que el modo de medición del medidor esté configurado para medir el parámetro deseado. Para los medidores Orion Star A215 y Orion Star A216, presione el botón f3 (canal) hasta que se muestre el canal o canales deseados en el modo de medición.

1. Enjuague el electrodo con agua destilada o un solvente adecuado y séquelo. Limpie el exceso de agua con un paño sin pelusa y luego colóquelo en muestra.
2. Inicie la medición y espere a que los datos de lectura se estabilicen o alcancen el tiempo programada.

- Lectura automática: Pulse la tecla de medición (esc) para iniciar la medición. En caso de usar una sonda de agitador, presione el botón de medición para comenzar (esc) y deje de agitar cuando el número de lectura es estable.
 - Continuo: Cuando se esté en modo de medición la lectura empezará. Si usa una sonda de agitador, presione el botón stirrer para empezar y dejar de agitar.
 - Tiempo: Comienza a medir inmediatamente en la modalidad de medición. Si está utilizando de agitador una sonda, haga clic en el botón de stirrer para detener el agitado y activarla.
3. Cuando la medición se haya estabilizado o alcanzado el intervalo de tiempo establecido, anote los parámetros correspondientes.
 - Lectura automática: Cuando sea seguro que la medición sea consistente, seguirá visible en la pantalla, se bloqueará y el ícono AR quedará fijo. Cuando está activada la función de registro de datos, se exportan al registro de datos los resultados de medición.
 - Continuo: El ícono (Stabilizing) dejará de parpadear cuando la medida se estabilice y se convertirá en un ícono fijo (Ready). Cuando la función de registro de datos se encuentre activa, presione Log/Print para guardar las mediciones en el registro.
 - Tiempo: Las mediciones se registran en intervalos de tiempos definidos previamente. Al estar habilitada la función de registro de datos, el ícono se presentará tras cada intervalo y las mediciones se consignarán en el registro.
 4. Retirar y enjuagar con agua destilada el electrodo que tomó lectura de la muestra, seque suavemente con un paño limpio y libre de residuos para eliminar el excedente de agua y ponerlos en la muestra siguiente.
 5. Ejecute nuevamente las instrucciones 2 a 4 para todas las muestras. Después de medir la totalidad de las muestras, almacene los electrodos conforme a las instrucciones establecidas en el manual.

2.3.4 Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica (CE) del agua se define como la capacidad que posee para conducir una corriente eléctrica. En el Sistema Internacional de Unidades, este parámetro se expresa en Siemens por metro (S/m) y guarda relación directa con la concentración de sales disueltas, cuya ionización permite el transporte de la corriente (Solís-Castro *et al.*, 2018). Para la lectura de la CE se empleó un potenciómetro Thermo Scientific, modelo Orion Star A215, junto con un electrodo ORION 013005MD. Para la calibración del equipo se utilizaron soluciones estándar de conductividad con valores de 100 μ S/cm, 1413 μ S/cm y 12.9 mS/cm.

Instrucciones para la medición de la conductividad

Prepare el sensor siguiendo las instrucciones señaladas en el manual del sensor. Conectar el total de los sensores, electrodos y sondas para la entrada del medidor adecuado. Asegúrese de que el sensor trabaja correctamente y no tenga mucho tiempo de haberse calibrado.

Asegúrese de que el modo de medición del medidor esté configurado para medir el parámetro deseado. Para medidores Star A215, presione la tecla f3 (Canal) hasta que muestra el canal o canales deseados en el modo de medición.

1. Enjuague los sensores con agua destilada o una solución adecuada y séquelos. Limpielos suavemente el exceso de agua con un paño sin pelusa, luego colóquelo en la muestra.
2. Inicie la medición y espere a que la lectura se estabilice o alcance tiempo preestablecido.
 - Lectura automática: pulse la tecla de medición (esc) para iniciar la medición. Si usas un sonda de agitación, presione el botón de medición para comenzar a agitar (esc) y dejar de remover cuando la medida se estabilice.
 - Continuo: cuando estás en modo de medición. Si usa una sonda agitadora, presione el botón agitador para que comience y deje de revolver.
 - Tiempo: cuando está en el modo de medida, la medición comienza inmediatamente. Si está utilizando una sonda agitadora, presione el botón agitador para iniciar y detener el ajeteo.

3. Una vez que la medición se estabilice o alcance el tiempo definido, registre todos los parámetros aplicables.

- Lectura automática: una vez que la medición sea estable, se bloqueará y permanecerá en la pantalla y el ícono AR permanece sólido. Cuando la función de registro de datos está activado, los resultados de la medición se exportan al registro de datos.
- Fijo: el icono fijo parpadeante se actualizará a un icono fijo Ready cuando la medida es estable. Si la función de registro de datos está activada, presione el botón Log/Print para exportar las mediciones al registro de datos.
- Tiempo: las mediciones se registran en intervalos de tiempo predefinidos. Si el registro de datos está habilitado, en cuyo caso se muestra el icono  cuando el intervalo de tiempo ha expirado y los resultados de la medición se exportan a un registro de datos.

4. Retire el sensor de la muestra y enjuague con agua destilada o solución. Seque suavemente con un paño sin pelusa para eliminar el exceso de material agua y ponerlos en la siguiente muestra.

5. Repita los pasos 2 a 4 para todas las muestras. Después de todas las medidas muestras, guarde el sensor de acuerdo con las instrucciones del manual sensor.

2.3.5 Voltaje

El voltaje, también denominado diferencia de potencial, corresponde a la fuerza o presión que impulsa a los electrones en dirección al cátodo. Este parámetro se suministra a través de una fuente de corriente continua o mediante un potenciómetro. (Aguilar-González *et al.*, 2016).

Para la medición del voltaje se utilizó el kit multímetro autorango RMS con interfaz USB que incluye un multímetro, puntas de prueba, sensor de temperatura y un cable USB

Instrucciones de uso del multímetro

- Inserte la punta roja de la terminal HzV Ω y la negra dentro de la terminal COM.
- Fije el interruptor giratorio en la medición que desea determinar: voltaje CA, voltaje CD, voltaje CD (milivolts), resistencia, capacitancia, continuidad, diodos, frecuencia, temperatura, corriente (microamperes), corriente (miliamperes), corriente (amperes).
- Conecte la punta de prueba con el objeto que se desea medir. El valor de la medición será mostrado en la pantalla

Las partes de multímetro son las siguientes:

- Pantalla de Cristal Líquido (LCD).
- Botones de Funciones
- Interruptor giratorio
- Terminal de entrada HzV Ω . Entrada para voltaje, frecuencia/ ciclo de trabajo, resistencia diodo, continuidad, medición de capacitancia y temperatura.
- Terminal de entrada COM. Terminal de retorno para todas las medidas.
- Terminal de entrada μ AmA. Entrada para 0,1 μ A a 600 mA medición de corriente.
- Terminal de entrada 10 A para medición de corrientes altas.

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIONES

El pH de las aguas residuales provenientes de mataderos presenta una amplia variación debido a su composición química, situándose por lo general entre 4.9 y 8.1, con un valor promedio cercano a 6.5. (Fabregas, 2023). El seguimiento del SBE se llevó a cabo durante 53 días, entre abril y junio. En ese periodo, el agua residual proveniente del rastro presentó un pH promedio de 9.0, mientras que el efluente mostró un valor medio de 8.6. En la figura 8 se observa que, entre los días 11 y 23, ocurre una variación notable entre el pH del influente y del efluente, lo cual podría estar relacionado con la actividad de microorganismos acidogénicos (Martínez-Pabón *et al.*, 2014).

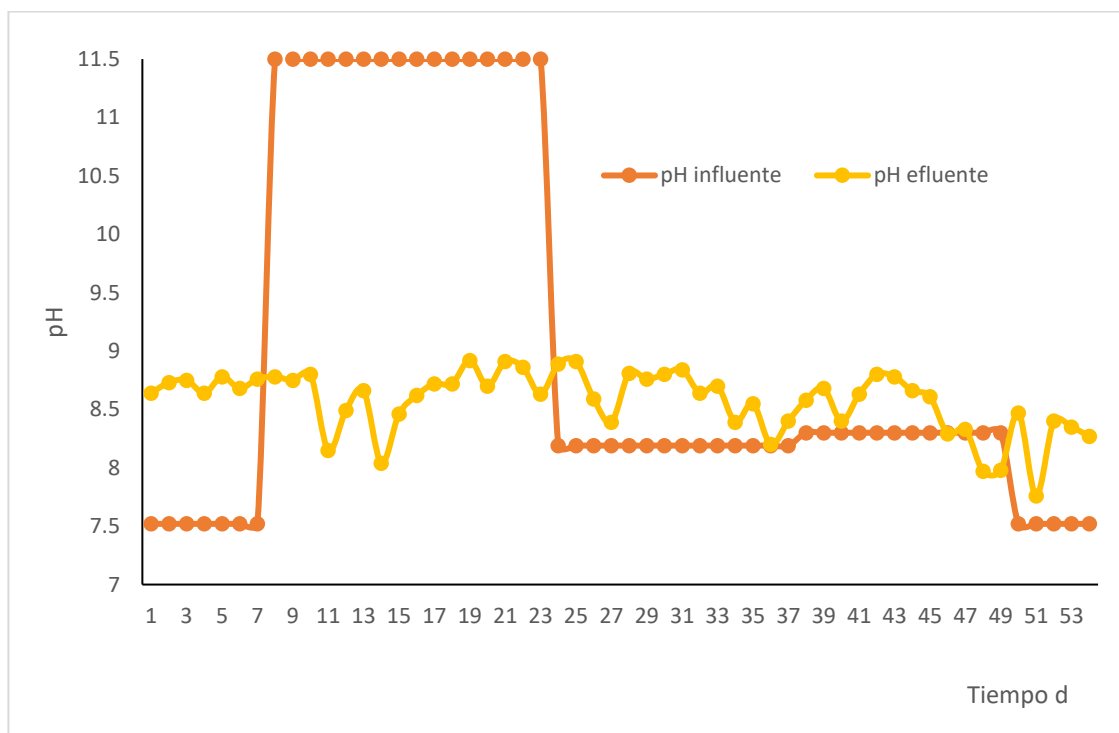


Figura 8. Comportamiento del pH en el sistema bioelectroquímico.

Se ha reportado que la DQO en las aguas residuales de mataderos suele ubicarse entre 4,000 y 12,000 mg/L (Borges et al., 2012). En el periodo en que se desarrolló esta tesis, el agua residual del rastro presentó un promedio de 4.8 g DQO/L. El tratamiento aplicado alcanzó un porcentaje de ERDQO del 73%, y se identifica una asociación entre la temperatura más baja y dicho porcentaje: cuando ocurre un descenso marcado en la temperatura, se observa inmediatamente una reducción en la eficiencia. Esto puede explicarse porque los microorganismos mesófilos —bacterias y hongos— presentan un rango óptimo de crecimiento y actividad metabólica entre 20 y 40 °C (Cárdenas, *et al.*, 2022) con una optima eficiencia a los 35 °C por lo que resulta ventajoso cultivar células en este rango de temperatura (Serrano-Yanez, *et al.*, 2015), la temperatura máxima y mínima fue de 28 y 10°C respectivamente, aún falta monitorear los meses con diferentes temperaturas, que podrían afectar el desempeño del sistema (figura 9).

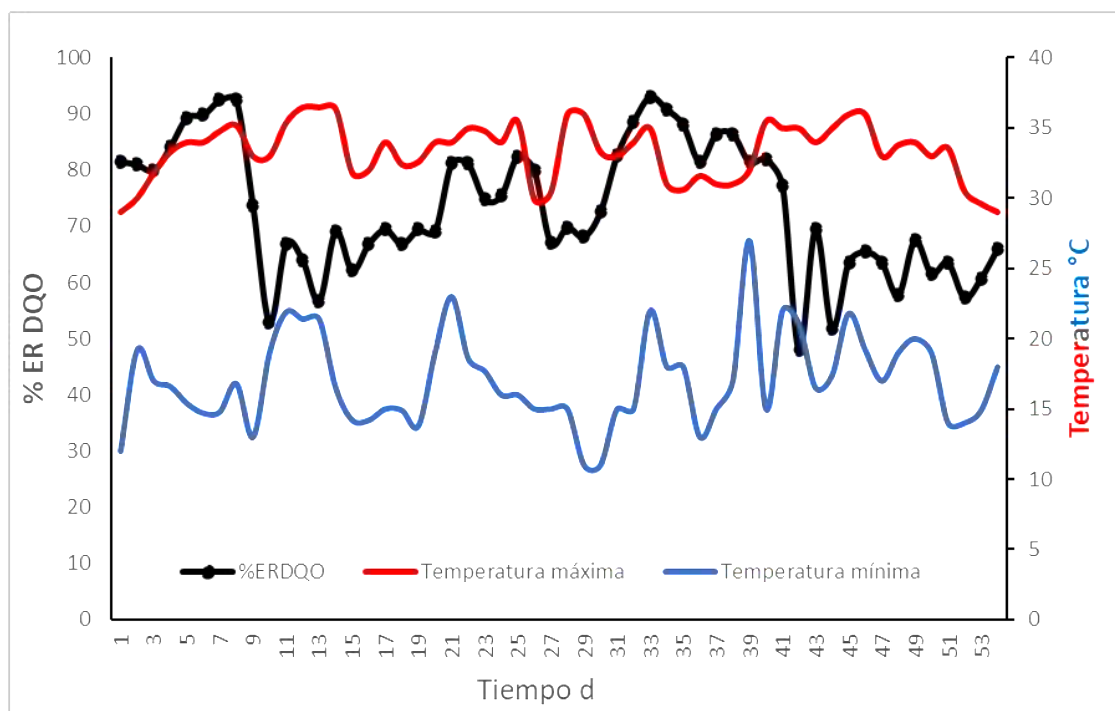


Figura 9. Porcentaje de remoción de la DQO en el SBE y temperatura registrada entre los meses de abril a junio del 2022.

La generación de voltaje promedio fue de 104 mV, teniendo como valor máximo 331.5 mV y mínimo de 7.56 mV (figura 10). La producción de voltaje (mV) pareciera ser inversamente proporcional al %ERDQO, así como con el paso del tiempo (días) donde la tendencia es ir en aumento, mismo comportamiento observado por Buitrón (2011) aunque las CCM se diferencian de otros sistemas de generación de energía por la característica de operar eficientemente a temperatura ambiente por lo que alteraciones en esta pueden afectar la generación de voltaje (Revelo *et al.*, 2015); este comportamiento deberá quedar claro cuando los días de monitoreo aumenten (figura 10). Las fluctuaciones de voltaje al inicio pueden estar relacionadas con la actividad microbiana en la biopelícula del ánodo, donde las bacterias electrogénicas desempeñan un papel, pero también con bacterias que no pueden transferir electrones al ánodo, pero descomponen la materia orgánica (Revelo *et al.*, 2015).

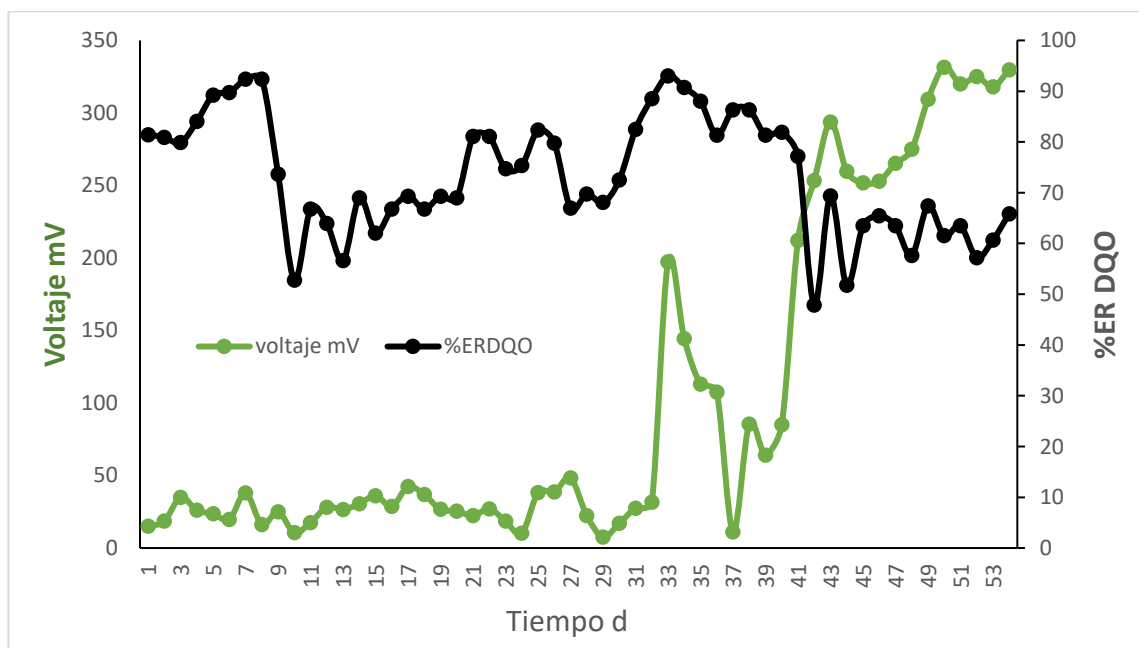


Figura 10. Generación de voltaje en SBE y porcentaje de eficiencia de remoción de la DQO entre los meses de abril a junio del 2022.

En la siguiente tabla se puede observar la conductividad eléctrica (CE) detectada durante el periodo de monitoreo del SBE. El promedio de la conductividad medida en el influente fue de 4.75 mS/cm, teniendo como el dato más alto de 6.56 mS/cm, mientras que el promedio del efluente fue de 4.70 mS/cm teniendo 8.7 mS/cm con el mayor valor (figura 11). Las diferentes conductividades del alimento y el efluente pueden deberse a la composición del alimento (por ejemplo, sustratos orgánicos como acetato o glucosa), pero también pueden deberse a la presencia de minerales que aumentan la conductividad. Cuando los microorganismos consumen sustratos y producen metabolitos, la conductividad fluctúa. Por ejemplo: cuando se forman ácidos orgánicos, la conductividad podría aumentar (Rojas-Flores, *et al.*, 2023).

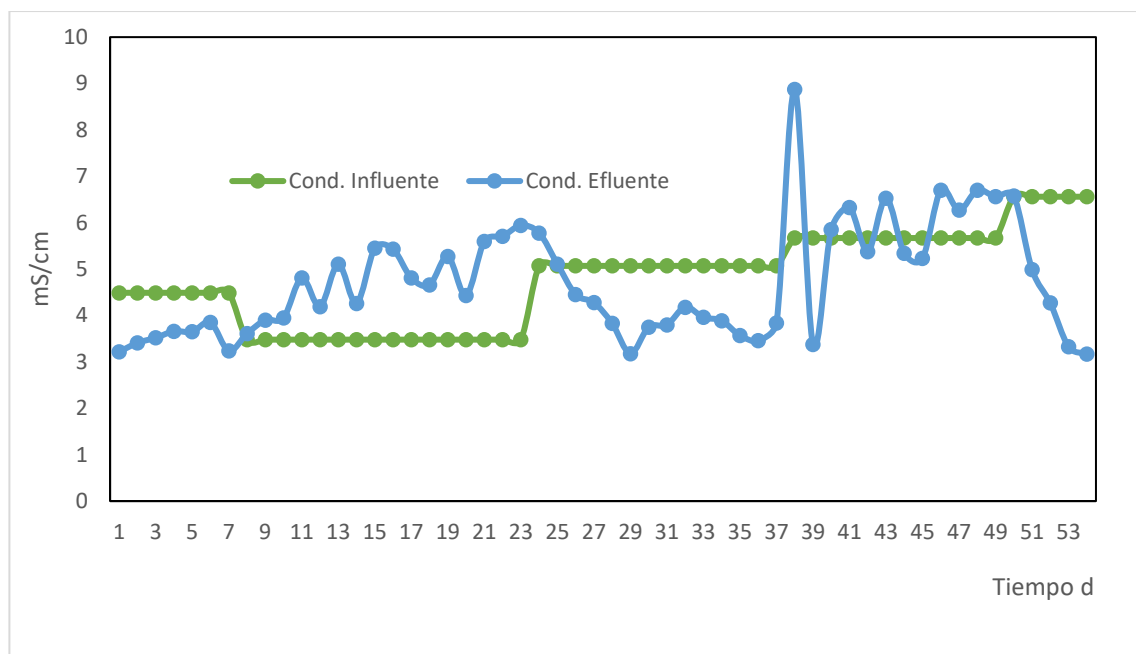


Figura 11. Conductividad de influente y efluente registrada en los días de monitoreo.

CONCLUSION

Los datos obtenidos demuestran la capacidad del tratamiento aplicado a aguas residuales con alto nivel de compuestos orgánicos como el agua residual del rastro mediante un sistema bioelectroquímico que además genera energía eléctrica en forma de voltaje.

BIBLIOGRAFÍA

1. Aguilar-González, M., Buitrón, G., himada-Miyasaka, A., Mora-Izaguirre, O. (2016) Estado actual de los sistemas bioelectroquímicos: factibilidad de su uso para aumentar la producción ruminal de propionato. Revista Agrociencia, vol.50 no.2. pp. 1-9 https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-31952016000200149&script=sci_arttext
2. Ali, S.; Aftab, A., Soomro, N., Nawaz, Mir S. & Vafai, K. (2015). Waste Water Treatment-Bed of Coal Fly Ash for Dyes and Pigments Industry. Pakistan Journal of Analytical & Environmental Chemistry. Revista de Química Analítica y Ambiental de Pakistán 16 (1), 48-56. <https://www.pjaec.pk/index.php/pjaec/article/view/116>
3. Borges, E. R. C., Rojas, A. B., Novelo, R. I. M., Rodríguez, J. H. O., & Canul, R. P. (2012). Remoción de materia orgánica en aguas residuales de rastro por el proceso de Contactor Biológico Rotacional. Ingeniería, 16(2), 83-91.
4. Buitrón, G., & Pérez, J. (2011). Producción de electricidad en celdas de combustible microbianas utilizando agua residual: efecto de la distancia entre electrodos. Tip Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas, 14(1), 5-11.
5. Cárdenas, D., Villegas, J. R., Solís, C., Sanabria-Chinchilla, J., Uribe, L., & Fuentes-Schweizer, P. (2022). Evaluación del desempeño de una celda de combustible microbiana con electrodo de grafito modificado para el tratamiento de agua residual del procesamiento del café. Revista Colombiana de Química, 51(1), 40-47.
6. Cárdenas-Cleves, L., Parra-Orobio, B., Torres-Lozada, P., Vásquez-Franco, C. (2016). Perspectivas del ensayo de Potencial Bioquímico de Metano – PBM para el control del proceso de digestión anaerobia de residuos. Revista Ion, 29(1). pp. 95-108 <http://dx.doi.org/10.18273/revion.v29n1-2016008>.
7. Chávez-Vera, I. (2017). Diseño e implementación de un sistema de tratamiento de Aguas residuales. Revista Científica Dominio de las Ciencias Vol. 3, núm. 1. pp. 536-560 URL:<http://dominiodelasciencias.com/ojs/index.php/es/index>.
8. De la Varga, D. (2014). Depuración de aguas residuales en digestores anaerobios y humedales construidos: aplicación a la industria vitivinícola (tesis doctoral). Universidad de La Coruña, La Coruña, España. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=44076>.

9. Elba R., Borges., Bolio A., Mendez R., Osorio J., Pat R. (2012). Remoción de materia orgánica en aguas residuales de rastro por el proceso de Contactor Biológico Rotacional Ingeniería, vol. 16, núm. 2, pp. 83-91 Univ. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46725067001>.
10. Elkhatab, E., Mahdy, A., Sherif F. & Hamadeen, H. (2015). Evaluation of a Novel Water Treatment Residual Nanoparticles as a Sorbent for Arsenic Removal. Journal of Nanomaterials. Revista Hindawi, (1), pp. 1-10. <https://doi.org/10.1155/2015/912942>
11. Fabregas, J. (2023, 25 noviembre). Tratamiento de aguas residuales de matadero y producción de carne. Sigmadaf. <https://sigmadafclarifiers.com/aguas-residuales-de-matadero>
12. González- Cabrera., A. (2014). Estudio técnico-económico para la producción de biogás a partir de residuos agrícolas mediante digestión anaerobia. pp. 22-36 <http://hdl.handle.net/11441/27048>
13. Liang, Y., Zhai, H., Liu, B., Ji, M., Li, J. (2020) El fieltro de grafito modificado con nanomateriales de carbono como ánodo mejoró la producción de energía y la eliminación de hidrocarburos aromáticos policíclicos en celdas de combustible microbianas de sedimentos. Vol. 713, ISSN 0048-9697. p. 136483. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136483>
14. López- Tirado., N. (2020) Análisis del efecto de las condiciones termo-hidráulicas de un sistema bio-electroquímico para generación de potencia eléctrica a partir de la degradación de azúcares. pp. 10-13 Obtenido de: <https://repositorioinstitucional.buap.mx/bitstream/handle/20.500.12371/11629/11772020T.pdf?sequence=1>
15. Martínez-Pabón, M.C., Delgado, C.M.M, López-Palacio, A.M, Patiño-Gómez, L.M. y Arango-Pérez, E.A. (2014). Las características fisicoquímicas y microbiológicas de la saliva durante y después del embarazo/características fisicoquímicas y microbiológicas de la saliva durante y después del embarazo. Revista de Salud Pública, Vol. 16 (1), pp. 115-125. <https://link.gale.com/apps/doc/A439036182/IFME?u=anon~fe404cc8&sid=googleScholar&xid=c89e153f>

16. Revelo, D. M., Hurtado, N. H., Ruiz, J. O., & López, S. (2015). Uso de microorganismos nativos en la remoción simultánea de materia orgánica y cr (VI) en una celda de combustible microbiana de biocátodo (CCM). *Información tecnológica*, Vol. 26(6), pp. 77-88.
17. Revelo, M., Hurtado, H., & Ruiz, O. (2013). Celdas de combustible microbianas (ccms): un reto para la remoción de materia orgánica y la generación de energía eléctrica. vol.24 no.6, pp. 17-28. La Serena. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642013000600004>.
18. Rivera, E., Sánchez, M., & Domínguez, H. (2018). pH como factor de crecimiento en plantas. *Revista de iniciación científica*, Vol 4, pp. 101-105. <https://doi.org/10.33412/rev-ric.v4.0.1829>
19. Rojas-Flores, S., Benites- Santiago, M., Agüero- Quiñones, R., Enríquez-León, R., Angelats-Silva, L. (2020) Bioelectricity through Microbial Fuel Cells from decomposed fruits using lead and copper electrodes. pp. 1-4 <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.17>
20. Rojas-Flores, S., Benites, S. M., La Cruz-Noriega, D., Nazario-Naveda, R., Gallozzo-Cardenas, M., Diaz, F., & Delfín-Narciso, D. (2023). Generación de energía eléctricas a través de desechos de lácteos en celdas de combustible microbianas. *LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology*. Vol 1, pp. 1-5
21. Serralta- Sevilla, J. (2013). Modelación matemática del tratamiento anaerobio de aguas residuales urbanas incluyendo las bacterias sulfatorreductoras. aplicación a un biorreactor anaerobio de membranas. Encontrado en: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/34778/Dur%E1n%20-%20Modelaci%F3n%20matem%E1tica%20del%20tratamiento%20anaerobio%20de%20aguas%20residuales%20urbanas%20incluyendo%20la....pdf?sequence=1>.
22. Serrano Yanez, C., Guerra Sánchez, R. J., & Buitrón Méndez, G. (2015). Cinéticas de degradación de DQO para el tratamiento anaerobio de aguas residuales de rastro. XI I Encuentro. Participación de La Mujer En La Ciencia, León, México, pp. 1-7. Encontrado en: S5-FMCT11.pdf

23. Solís-Castro, Y., Zúñiga-Zúñiga, L., Mora-Alvarado, D. (2018) La conductividad como parámetro predictivo de la dureza del agua en pozos y nacientes de Costa Rica. *Revista Tecnología En Marcha*, Vol. 31(1), pp. 35–46. https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0379-39822018000100035
24. Torres-Zamata, G., Condori-Pacheco, E., Fernández-Rojas, H., Pampa-Quispe, N. (2020). Efecto de la resistencia externa y área superficial del electrodo de grafito en la biodegradación de la materia orgánica y generación de bioelectricidad en celdas de combustible microbiano. *Revista de Tecnología y Ciencia del Agua*, Vol. 11 (6), pp. 1-38. Encontrado en: <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2020-06-01>.
25. Vallejo-Rodríguez, R., López-López, A., Gallardo-Váldez, J. (2019). Manejo integral de efluentes residuales generados en los rastros municipales, Jalisco, México: Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco A.C. (CIATEJ) Vol. 1. pp. 12-20 Encontrado en: <https://ciatej.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1023/683/1/1%20Libro%20rastros%20version%20final.pdf>
26. Zhangunb, Y., Solunb, J., Hu, Y., Liunb, S., Xu, Q. (2012) Evaluación de materiales biocátodos en celdas de combustible microbianas: una comparación de fieltro de grafito, papel de carbono y materiales de malla de acero inoxidable. *V 37, Número 22*, pp. 16935-16942. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.08.064>