

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO**  
**DIVISIÓN DE INGENIERÍA**  
**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO**



Recuperación de energía eléctrica y remoción de materia orgánica en un sistema bioelectroquímico empacado con ánodos de grafito y espuma de poliuretano durante el tratamiento de agua residual del rastro

Por:

**MIREYA SANCHEZ ZUÑIGA**

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

**INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL**

Saltillo, Coahuila, México

Mayo de 2025

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO**  
**DIVISIÓN DE INGENIERÍA**  
**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO**

Recuperación de energía eléctrica y remoción de materia orgánica en un sistema bioelectroquímico empacado con ánodos de grafito y espuma de poliuretano durante el tratamiento de agua residual del rastro

Por:

**MIREYA SANCHEZ ZUÑIGA**

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

**INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL**

Aprobada por el jurado examinador:

  
Dr. Pedro Pérez Rodríguez  
Presidente

  
Dra. Silvia Yudith Martínez Amador  
Vocal

  
Dra. Aida Isabel Leal Robles  
Vocal

  
Dr. Alfredo Valentín Reyes Acosta  
Vocal suplente

  
M.C. Sergio Sánchez Martínez  
Coordinador de la División de Ingeniería  
Buenavista, Saltillo Coahuila, México.

Mayo de 2025

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO**  
**DIVISIÓN DE INGENIERÍA**  
**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO**

Recuperación de energía eléctrica y remoción de materia orgánica en un sistema bioelectroquímico empacado con ánodos de grafito y espuma de poliuretano durante el tratamiento de agua residual del rastro

Por:

**MIREYA SANCHEZ ZUÑIGA**

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

**INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL**

Aprobada por el Comité de Asesoría:

  
Dr. Pedro Pérez Rodríguez  
Asesor-Principal Interno

  
Dr. Alfredo Valentín Reyes Acosta  
Asesor Principal Externo

  
Dra. Silvia Yudith Martínez Amador  
Coasesor

  
Dra. Aida Isabel Leal Robles  
Coasesor

Saltillo, Coahuila, México.

Mayo de 2025

## DERECHOS DE AUTOR Y 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 o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos:

Reproducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (cortar y pegar); 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 material 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, organización medio público o privado.

Autor



Mireya Sanchez Zuñiga

Asesor principal



Dr. Pedro Pérez Rodríguez

## **DEDICATORIA**

**A DIOS** por su amor y bondad, por darme la sabiduría e inteligencia que me permitieron sonreír ante todos mis logros que son el resultado de su ayuda, este trabajo de tesis ha sido una gran bendición en todo sentido y te lo agradezco padre, solo puedo decir que es gracias a ti que esta meta esta cumplida.

### **A MIS PADRES**

**Lázaro Sanchez Campos**

**Maricela Zuñiga Sanchez**

Gracias, papás por ser los principales promotores de mis sueños porque, aunque con mucho miedo de soltarme decidieron confiar en mí, perdón por haberles echo tener una preocupación más, y hacerlos derramar más de una lagrima cada que salía de casa. A pesar de la enorme distancia que nos separaba, su afecto y cariño fueron los detonantes de mi felicidad y de mi esfuerzo, de las ganas que tenia de salir adelante y demostrarles que el sacrificio que hacían por mi había valido la pena, no les miento los extrañaba como no se imaginan, día a día me hacían mucha falta, pero yo sabía que todo sacrificio tendría su recompensa. Desde pequeña las primeras palabras que aprendí fueron MAMÁ Y PAPÁ; hoy las digo con orgullo y consiente de lo que representan, sé que siempre voy a necesitar de su sabiduría y consejos, de sus abrazos que son mi refugio. Perdónenme por fallarles en algunas ocasiones, sigo luchando por ser mejor y sé que dios no nos dejara en ni un momento. Gracias por tanto papás no me alcanzaría la vida para agradecerles todo lo que han hecho por mí. Los amo con toda mi alma.

**A MI HERMANO** Saul Ibsan Sanchez Zuñiga has estado conmigo toda mi vida, eres mi mayor ejemplo a seguir. Gracias por demostrarme que no existe edad ni impedimento para hacer lo que uno se proponga, eres un ejemplo de valentía, fortaleza y admiración. Gracias por cada uno de tus consejos por apoyarme y estar para mí siempre que lo necesite, te amo hermano.

**A MIS ABUELOS** quienes han creído en mí siempre. Emilia Sanchez Rodríguez, Nicasio Zuñiga Gómez. Desde pequeña velaron por mí, solo siento una gran emoción y un profundo agradecimiento por tenerlos como mis abuelos, en este momento los recuerdos tocan mi corazón y me hacen recordar su sabiduría, su paciencia y los buenos momentos a su lado, gracias por todo abuelitos, los amo infinitamente.

Santa Campos Elizalde (+) Aureliano Sanchez Pastrana (+) Gracias por los años de felicidad que me regalaron y aunque hoy ya no se encuentren en este mundo su recuerdo seguirá dentro de mi corazón y por ellos ustedes siempre seguirán viviendo. Estoy segura de que desde el cielo comparten esta felicidad conmigo.

**A MIS PRIMOS** Marcelo Sanchez Alvarado (+), Carlos Sanchez, Kenia Zuñiga, Diego Sanchez, Andrea Sánchez, Mayte Sanchez, Megan Sanchez, Sergio Zuñiga. Por motivarme y aconsejarme cuando más los necesite.

**A MIS TIOS** Brenda Elizalde, Lorena Zuñiga, Juan Sanchez, Sergio Zuñiga, Gilberto Sanchez, María Esther Sanchez. Gracias por darme el ejemplo de superación, humildad y sacrificio enseñándome a valorar todo lo que tengo.

**A MIS AMIGOS** Salma Elizalde, Cristian Joel, Ing. Juan José, Mar Guadalupe (Mor Bella) Margarita, Ing. Alexis Bravo, Monse Ramos, Miguel, Brajhan. Ing. Deyanira. Estuvieron conmigo en los momentos de estrés y alegría, tantas experiencias juntos durante este largo y retador camino, su apoyo y confianza han sido invaluable, cada uno de ustedes tiene un lugar muy especial en mi corazón.

A la Ing. Dania Castañeda Gracias por estar conmigo en cada momento, por creer en mí, por tus palabras de aliento y esas conversaciones interminables que me ayudaron a encontrar claridad cuando más lo necesitaba, tu apoyo incondicional, tus risas en los momentos de estrés y tu compañía han sido un pilar fundamental en esta etapa de mi vida. No tengo suficientes palabras para expresar cuanto valoro tu amistad, tú sabes cuanto te amo flaca, gracias por todo.

## AGRADECIMIENTOS

A MI **ALMA TERRA MATER** por haberme permitido formarme en sus aulas, compartiendo ilusiones y anhelos. Con constancia dedicación y esfuerzo alcance mis sueños. ¡Gracias!

Al **DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO** Gracias por brindarme una experiencia enriquecedora durante mi instancia profesional, fueron fundamentales en mi aprendizaje y crecimiento, fue una experiencia invaluable.

A el **Dr. Pedro Pérez Rodríguez** por compartirme sus conocimientos, sus orientaciones, su manera de trabajar, su persistencia, su paciencia y su motivación. han sido fundamentales para mi formación profesional.

A el **Dr. Alfredo Valentín Reyes Acosta, Dra. Silvia Yudith Martínez Amador, y Dra. Aida Isabel Leal Robles.** Por su valioso apoyo y participación para la realización de este proyecto. ¡Muchas gracias!

## ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS.....	10
ÍNDICE DE TABLAS.....	10
RESUMEN.....	11
INTRODUCCIÓN.....	12
OBJETIVO GENERAL.....	13
Objetivos específicos.....	13
HIPÓTESIS.....	14
CAPÍTULO I.....	15
REVISIÓN DE LITERATURA.....	15
1.1. Tratamiento de aguas residuales.....	15
1.1.1. Fuentes y características de aguas residuales del rastro.....	15
1.1.1.1. Definición de aguas residuales del rastro.....	15
1.1.1.2. Composición química y biológica.....	16
1.1.1.3. Impacto ambiental de las aguas residuales no tratadas.....	16
1.1.2. Métodos convencionales de tratamiento.....	17
1.1.2.1. Métodos físicos.....	17
1.1.2.2. Métodos químicos.....	17
1.1.2.3. Métodos Biológicos.....	18
1.2. Sistemas bioelectroquímicos (SBE).....	18
1.2.1. Tipos de Sistemas Bioelectroquímicos.....	19
1.2.2. Principales componentes de los SBE.....	20
1.2.3. Factores que Influyen en los SBE.....	22
CAPÍTULO II.....	24
MATERIALES Y MÉTODOS.....	24
1.1. Ubicación del experimento.....	24
1.2. Tipo de agua y lugar de colecta.....	24
1.3. Preparación de los materiales.....	24
1.4. Construcción y operación de la CCM.....	25
1.5. Determinación de materia orgánica en la CCM.....	27
1.5.1. Material y equipo.....	27
1.5.2. Procedimiento.....	27

CAPÍTULO III.....	28
RESULTADOS Y DISCUSIONES .....	28
.1. Voltaje.....	28
.2. Densidad de potencia.....	29
.3. Eficiencia en la remoción de DQO .....	30
.4. Eficiencia coulombica.....	31
CONCLUSIÓN.....	32
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	33

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de los principales tipos de SBE: a) celda de combustible microbiana, b) celda de electrolisis microbiana. ....	20
Figura 2. Esquema de un SBE convencional y sus componentes principales. ....	22
Figura 3. Diagrama de la CCM utilizada en los experimentos. ....	26
Figura 4. Voltaje generado por las CCM empacadas con los compósitos de PUG+BGL, BG+PUGL y PUGBG como ánodos. ....	28
Figura 5. Densidad de potencia generada por las CCM empacadas con los compósitos de PUG+BGL, BG+PUGL y PUGBG como ánodos. ....	29
Figura 6. Eficiencia de remoción de DQO al final del ciclo operativo de las CCM. ....	30
Figura 7. Eficiencia coulombica obtenida en las CCM. ....	31

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tratamientos evaluados en las CCM. ....	25
--	----

## RESUMEN

En esta investigación se evaluó la recuperación de energía eléctrica y la remoción de materia orgánica mediante una celda de combustible microbiana (CCM) empacada con diferentes configuraciones de ánodos compuestos, durante el tratamiento de aguas residuales procedentes del rastro municipal. Se fabricaron tres tipos de ánodos: (i) espuma de poliuretano cubierta con grafito en aerosol conectada al circuito externo con una barra de grafito libre en el medio (PUG+BGL), (ii) barra de grafito conectada al circuito externo acompañada de espuma de poliuretano cubierta con grafito en aerosol libre en el medio (BG+PUGL) y (iii) espuma de poliuretano cubierta con grafito en aerosol unida a una barra de grafito y conectada al circuito externo (PUGBG). Se monitorearon el voltaje, la densidad de potencia, la remoción de demanda química de oxígeno (DQO) y la eficiencia coulombica (EC).

Los resultados mostraron que la configuración PUGBG presentó el mejor desempeño electroquímico, con un voltaje máximo de 153.1 mV, una densidad de potencia de 23.44 mW/m<sup>3</sup> y una EC de 0.59%. Por otro lado, la mayor remoción de DQO (76.28%) se obtuvo en la configuración BG+PUGL. Estos resultados evidencian que la eficiencia en la producción de energía no está directamente relacionada con la capacidad de remoción de materia orgánica, y que la conectividad y estructura del ánodo son factores determinantes en el rendimiento del sistema.

En conclusión, los materiales compuestos evaluados muestran un potencial prometedor para su aplicación en tecnologías bioelectroquímicas orientadas al tratamiento de aguas residuales con recuperación simultánea de energía, aunque se requieren mejoras en la eficiencia coulombica y en las condiciones operativas para su implementación a escala real.

Palabras claves: Grafito, celda de combustible, sistema bioelectroquímico, densidad de potencia, ánodo.

## INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de agua potable y las estrictas regulaciones ambientales han impulsado el desarrollo de tecnologías innovadoras para el tratamiento de aguas residuales. Particularmente los rastros generan grandes volúmenes de aguas residuales con altas concentraciones de materia orgánica cuya descarga sin tratamiento adecuado puede ocasionar graves impactos ambientales. Tradicionalmente, los métodos convencionales de tratamiento, como los procesos físico-químicos y biológicos, han mostrado limitaciones en términos de eficiencia energética y sostenibilidad.

En este contexto los sistemas bioelectroquímicos han emergido como una alternativa prometedora, al integrar procesos biológicos y electroquímicos para la remoción simultánea de contaminantes y la recuperación de energía en forma de electricidad. Estos sistemas aprovechan la capacidad de ciertos microorganismos electrogénicos para transferir electrones generados en la oxidación de la materia orgánica hacia un electrodo, generando una corriente eléctrica utilizable.

El tipo de material empleado para la construcción de los electrodos, especialmente los ánodos, juega un papel crucial en el rendimiento de los BES. El grafito es un material ampliamente utilizado debido a su buena conductividad, estabilidad química y bajo costo. Sin embargo, su limitada área superficial puede restringir la actividad microbiana. Por otro lado, materiales como la espuma de poliuretano ofrecen una alta porosidad y una amplia área de superficie específica, lo que favorece el crecimiento de biopelículas electroactivas y potencialmente mejora la eficiencia del sistema. La presente investigación se enfocó en evaluar la recuperación de energía eléctrica y la remoción de materia orgánica en un sistema bioelectroquímico empacado con ánodos compuestos de grafito y espuma de poliuretano durante el tratamiento de aguas residuales provenientes de un rastro.

## **OBJETIVO GENERAL**

Evaluar el desempeño en la producción de voltaje, corriente, densidad de potencia y remoción de materia orgánica de una celda de combustible microbiana con diferentes configuraciones de electrodos de grafito y espuma de poliuretano durante el tratamiento de agua residual del rastro.

### **Objetivos específicos**

1. Sintetizar los electrodos de grafito y espuma de poliuretano.
2. Construir y operar tres CCM escala laboratorio.
3. Caracterizar electroquímicamente las CCM.
4. Determinar la remoción de materia orgánica en las CCM durante el tratamiento de agua residual del rastro.

## **HIPÓTESIS**

La incorporación de ánodos compuestos de espuma de poliuretano cubierta con grafito en aerosol y barras de grafito conectadas al circuito eléctrico en un sistema bioelectroquímico mejora significativamente la generación de energía eléctrica y la remoción de materia orgánica durante el tratamiento de aguas residuales de rastro, en comparación con configuraciones en las que estos materiales se utilizan de forma individual o no están conectados al circuito.

# **CAPÍTULO I**

## **REVISIÓN DE LITERATURA**

### **1.1. Tratamiento de aguas residuales**

El tratamiento de aguas residuales es un proceso que consiste en la separación de la carga orgánica que contienen estos efluentes eliminando al máximo la cantidad de residuos y contaminantes. Consiste también en una serie de procesos físicos, químicos y biológicos que buscan eliminar los contaminantes presentes en el agua resultante del uso humano o de otros usos (Metcalf & Eddy, 2004).

#### **1.1.1. Fuentes y características de aguas residuales del rastro**

Las principales fuentes contaminantes de las aguas residuales del rastro se originan por las heces, orina, sangre, pelusa, residuos de la carne, grasas alimentos no dirigidos por los intestinos y las tripas de los animales sacrificados. Se caracterizan por contener altas concentraciones de proteínas, grasas, aceites sólidos suspendidos y otros productos de la industria de la carne. En la mayoría de los rastros en México, la disposición de los efluentes del proceso se da regularmente sin previo o escaso tratamiento, lo que los convierte en una fuente importante de contaminación de las aguas superficiales debido a la constitución de su efluente y al potencial de eutrofización que deriva de éste (Pérez-Padilla, & López-Torres, 2010).

##### **1.1.1.1. Definición de aguas residuales del rastro**

Las aguas residuales del rastro son los efluentes líquidos generadores en los mataderos o rastros durante el sacrificio, procesamiento y limpieza de animales. Estas aguas contienen una alta carga de materia orgánica, incluyendo sangre, grasa, restos de piel, excrementos y productos químicos utilizados en la

desinfección, lo que las convierte en un importante foco de contaminación si no son tratadas adecuadamente antes de su disposición o reutilización (SEMARNAT, 2010).

#### **1.1.1.2. Composición química y biológica**

Las aguas residuales de los rastros contienen una mezcla compleja de contaminantes orgánicos e inorgánicos, además de microorganismos potencialmente patógenos. Su composición varía según el tipo de animal procesado, los procedimientos de sacrificio y la cantidad de agua utilizada en el proceso (Rodríguez & Herrera, 2012).

- Composición química: materia orgánica, sangre (rica en proteínas y hemoglobina), grasas y aceites, restos de carne, piel y vísceras, e hidratos de carbono y fibras provenientes del tracto digestivo.
- Nutrientes: nitrógeno (principalmente en forma de amonio, proteínas y urea) y fósforo (provenientes del tejido y productos de limpieza).
- Compuestos químicos: detergentes y desinfectantes (cloro, hipoclorito de sodio, ácidos y álcalis), sulfatos y cloruros, y metales en bajas concentraciones (zinc, hierro, cobre).
- Composición biológica (patógenos): bacterias: *Escherichia coli*, *salmonella ssp*, *clostridium ssp*, *listeria monocytogenes*, y virus: Algunos entéricos presentes en materia fecal.
- Parásitos: huevos y quistes de *Giardia*, *Cryptosporidium*, *taenia ssp*.

#### **1.1.1.3. Impacto ambiental de las aguas residuales no tratadas**

Uno de los más graves problemas que aquejan al medio ambiente son las descargas de aguas residuales provenientes de los rastros. Este tipo de agua contiene concentraciones altas de materia orgánica, grasas, proteínas y nutrientes, entre otros. El impacto que causan las aguas residuales de los rastros sin tratar es

destrutivo, acaba el oxígeno disuelto además de aumentar notablemente la turbidez y favorece el crecimiento excesivo de materia orgánica provocando un crecimiento acelerado de algas y otras plantas verdes (Hernández & Romero, 2015).

### **1.1.2. Métodos convencionales de tratamiento**

Los métodos convencionales de tratamiento de aguas residuales incluyen procesos físicos, químicos y biológicos.

#### **1.1.2.1. Métodos físicos**

Se enfocan en la separación de sólidos y partículas mediante procesos mecánicos (Villanueva & Medina, 2015).

- Rejillas y desarenadores: Retienen sólidos grandes, como restos de carne, huesos y pelos.
- Desarenado: Remueve arenas y partículas pesadas para evitar daño en equipos posteriores.
- Sedimentación primaria: Separa sólidos suspendidos mediante sedimentación en tanques.
- Flotación por aire disuelto (DAF): se usa para eliminar grasas, aceites y proteínas mediante burbujas de aire.
- Filtración: Se utilizan arenas y carbono activado para remover partículas finas y compuestos orgánicos.

#### **1.1.2.2. Métodos químicos**

Implican la adición de productos químicos para mejorar la separación de contaminantes y eliminar microorganismos (López & Martínez, 2019).

- Coagulación y floculación: se añaden productos químicos (como sulfato de aluminio o cloruro férrico) que agrupan partículas pequeñas en flóculos más grandes. estos flóculos se eliminan fácilmente en la sedimentación o flotación.
- Neutralización: se ajusta el pH del agua mediante ácidos o bases para evitar corrosión o toxicidad en procesos biológicos.
- Desinfección: se usan productos como cloro, ozono o luz ultravioleta para eliminar bacterias, virus y otros patógenos antes de la descarga del agua tratada.

### **1.1.2.3. Métodos Biológicos**

Se basan en el uso de microorganismos para degradar la materia orgánica presente en el agua residual (Castaño & Herrera, 2017).

- Lodos activos: usa microorganismos para descomponer la materia orgánica.
- Reactores anaerobios: descomponen la materia orgánica en ausencia de oxígeno produciendo biogás.
- Lagunas de estabilización: son estanques donde bacterias degradan los contaminantes de forma natural.
- Biofiltros y biodiscos: los microorganismos crecen en soportes sólidos (grava, plástico o discos rotatorios) y descomponen la materia orgánica al contacto con el agua residual.

## **1.2. Sistemas bioelectroquímicos (SBE)**

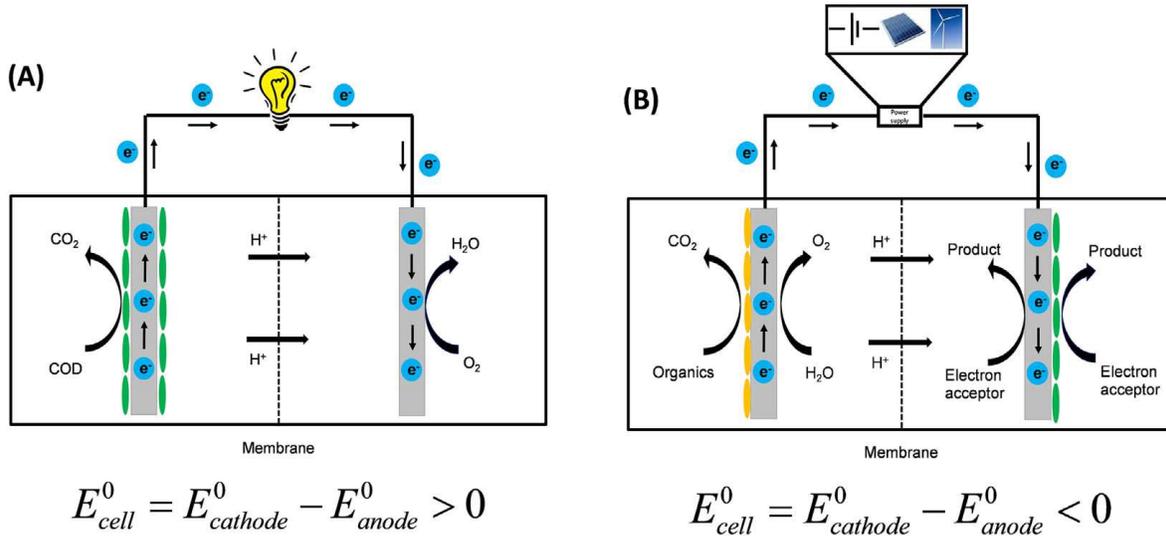
Los sistemas bioelectroquímicos son sistemas que combinan la electroquímica con la biología microbiana, aprovechando la capacidad de algunos microorganismos para realizar reacciones de oxidación-reducción, principalmente reacciones de transferencia de electrones. Estos sistemas pueden utilizar la energía química para

producir electricidad, o viceversa, para realizar reacciones químicas (Aguilar-González et al., 2016).

### **1.2.1. Tipos de Sistemas Bioelectroquímicos**

Los sistemas bioelectroquímicos se dividen principalmente en celdas de combustible microbianas (CCM) y celdas de electrolisis microbianas (CEM). Las CCM generan energía eléctrica a partir de la degradación de sustancias orgánicas por microorganismos, mientras que las CEM utilizan energía eléctrica para impulsar reacciones químicas, como la producción de hidrogeno o peróxido de hidrogeno (Pérez-Rodríguez et al., 2018).

- Celdas de combustible microbiana (CCM): aprovechan el metabolismo de microorganismos para generar electricidad. Los microorganismos en el ánodo oxidan compuestos orgánicos, liberando electrones que viajan a través de un circuito externo hasta el cátodo, donde se combinan con protones y oxígeno (u otro aceptor) para formar agua u otros subproductos. Son utilizadas en la producción de energía, tratamiento de aguas residuales, y la producción de productos químicos de valor añadido. Son una alternativa sostenible a la producción de energía tradicional, ya que utilizan microorganismos para generar energía a partir de desechos.
- Celdas de electrolisis microbiana (CEM): utilizan energía eléctrica para impulsar reacciones de reducción y oxidación, principalmente en el ámbito de la electroquímica. Los microorganismos en el ánodo o el cátodo facilitan estas reacciones. Son utilizadas en la producción de productos químicos como hidrogeno, peróxido de hidrogeno, hidróxido de sodio y otros. También se usan en la desnitrificación y la electro-síntesis microbiana. Permiten la producción de productos químicos de valor añadido de forma sostenible, utilizando energía eléctrica renovable.



**Figura 1.** Esquema de los principales tipos de SBE: a) celda de combustible microbiana, b) celda de electrolisis microbiana (Gadkari et al., 2018).

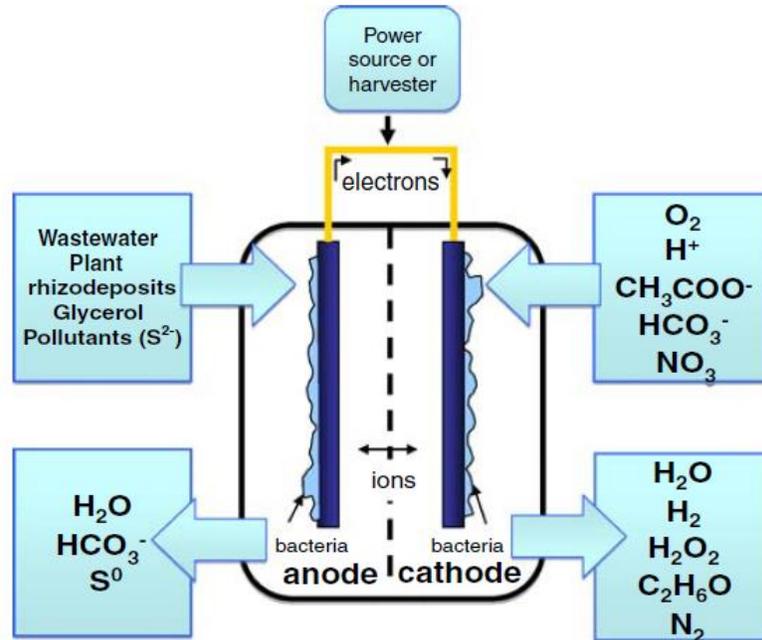
### 1.2.2. Principales componentes de los SBE

Los principales componentes de los sistemas bioelectroquímicos (BES) son:

- **Ánodo:** es un electrodo sólido conductor de electricidad donde los microorganismos facilitan procesos de oxidación, liberando electrones. En los SBE, la reacción en el ánodo es catalizada por microorganismos. A los microorganismos que transfieren electrones al ánodo se les llama exoelectrógenos. Los materiales comunes para el ánodo incluyen fieltro de carbono, malla de carbono, cepillo de fibra de grafito y tela de carbono. El grafito en gránulos y placas de grafito también suele ser utilizado (Gadkari et al., 2018).
- **Cátodo:** es el otro electrodo sólido conductor de electricidad donde los microorganismos o catalizadores abióticos facilitan procesos de reducción, capturando electrones. Los electrones fluyen del ánodo al cátodo a través de un material conductor. En los SBE, la reacción en el cátodo puede ser catalizada con ayuda de microorganismos. Los microorganismos utilizados

en los cátodos son capaces de catalizar ciertas reacciones aceptando electrones de los electrodos. Diversos aceptores de electrones pueden ser utilizados por estos microorganismos, como protones, oxígeno, nitrato o sulfato (Wilberforce et al., 2021).

- Microorganismos: son cruciales para el funcionamiento de los SBE, actuando como biocatalizadores que convierten la energía química en energía eléctrica (y viceversa). Facilitan las reacciones electroquímicas en el ánodo y/o el cátodo. La comunidad microbiana puede ser diversa y sus funciones incluyen la degradación de sustratos, la generación de electricidad y la participación en ciclos de elementos (Zhang et al., 2019).
- Membrana de intercambio catiónico (MIC): un elemento que puede estar presente para separar las cámaras del ánodo y el cátodo. Es crucial para obtener altas eficiencias y productos puros, aunque también puede aumentar la resistencia interna del sistema. En sistemas de una sola cámara, esta membrana no está presente (Logan et al., 2019).
- Sustrato: son las moléculas orgánicas consumidas por los microorganismos. Actúan como una fuente de energía de carbono para el desarrollo bacteriano y son esenciales para la producción de iones y electrones en el ánodo. La naturaleza, los componentes y la concentración del sustrato influyen en la comunidad microbiana y en el rendimiento energético del SBE. Se han considerado varios sustratos, incluyendo aguas residuales, desechos orgánicos, materiales orgánicos simples y complejos (Kronenberg et al., 2017).



**Figura 2.** Esquema de un SBE convencional y sus componentes principales (Hamelers et al., 2010).

### 1.2.3. Factores que Influyen en los SBE

En los SBE existen múltiples factores que influyen en su rendimiento y eficiencia, de entre estos destacan (Carrera, 2018):

- Carga orgánica y composición del sustrato: la concentración de la carga orgánica y la composición de dicho sustrato afectan directamente al desempeño de los SBE. Altas y bajas cargas orgánicas pueden inhibir el metabolismo microbiano, disminuyendo la capacidad del sistema para generar electricidad. De igual forma, la composición es de suma importancia, entre más complejo sea el sustrato, más difícil será para los microorganismos exoelectrógenos el asimilarlo (Borges et al., 2012).
- Diversidad y actividad microbiana: la comunidad microbiana desempeña un papel fundamental en el rendimiento de los sistemas bioelectroquímicos, utilizados para el tratamiento de aguas residuales especialmente en entornos como rastros (mataderos) donde las aguas tienen una alta carga orgánica y

composición compleja. Especialmente en la oxidación de contaminantes orgánicos y la generación de energía, estos sistemas aprovechan la capacidad de ciertos microorganismos para catalizar reacciones electroquímicas, transfiriendo electrones y generando electricidad. La comunidad microbiana compuesta por una variedad de especies, es la encargada de llevar a cabo la oxidación y la transferencia de electrones, lo que impacta directamente en la eficiencia del sistema, en la remoción de contaminantes y la producción de energía (Gasca, 2010).

- Condiciones operativas del sistema: el pH, la temperatura y el tiempo de retención hidráulica (TRH) tiene efectos importantes en el desempeño de los SBE. Un pH, fuera de los rangos óptimos puede afectar la solubilidad de metales pesados, la eficiencia de los procesos biológicos y la formulación de compuestos tóxicos. La temperatura influye en la velocidad de las reacciones químicas y biológicas, así como en la concentración de oxígeno disuelto. El tiempo de retención es crucial para la adecuada sedimentación de sólidos y la eliminación de contaminantes mediante procesos biológicos (DE AGUAS, 2021).

## **CAPÍTULO II**

### **MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **1.1. Ubicación del experimento**

El experimento se llevó a cabo en el laboratorio de Biología General del Departamento de Botánica de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, ubicada en Buenavista, Saltillo, Coahuila.

#### **1.2. Tipo de agua y lugar de colecta**

Para la realización de este trabajo se colectó agua residual proveniente del rastro municipal (TIF 377). La misma, fue utilizada en los experimentos sin ningún tipo de pretratamiento.

#### **1.3. Preparación de los materiales**

Se recortaron piezas de 4 cm<sup>2</sup> de espuma de poliuretano, lavando posteriormente este material con agua destilada y acetona con el fin de remover impurezas. Enseguida, las piezas fueron colocadas en una estufa de secado a una temperatura de 80°C durante un lapso de una hora, o hasta llegar a peso constante. A continuación, se realizó un recubrimiento de las piezas de espuma de poliuretano (previamente lavadas) con grafito en aerosol (Dry Graphite Lube), aplicando 3 capas en cada cara del soporte (espuma PU), posteriormente se secó este material a temperatura ambiente. Por último, las piezas recubiertas fueron lavadas con agua destilada para remover el exceso de grafito. Las barras de grafito como colectores de electrones fueron pretratadas por dos métodos dependiendo su ubicación en la celda de combustible microbiana (colector anódico y cátodo). Previo al acondicionamiento, las barras de grafito fueron lijadas secuencialmente con papel

lija de 400, 600 y 1200 micras grano, enjuagando en cada paso abundantemente con agua destilada.

- Colector anódico: los colectores de grafito fueron sumergidos secuencialmente durante 1 hora en soluciones de HCl 1M, agua desionizada, NaOH 1M, y agua desionizada. Por último, se secaron en un horno a 80°C por 12 horas.
- Cátodo: se colocó una barra de grafito en un vaso de precipitados de 1000 ml añadiendo una solución de ácido nítrico al 5 %. La mezcla fue hervida por 12 horas a una temperatura constante de 120 °C. El material fue lavado con agua destilada (agitanando por 15 minutos), y finalmente, se colocó en un horno de secado a 130°C por 12 horas, almacenando el material hasta su uso.

#### 1.4. Construcción y operación de la CCM

Se construyeron celdas de combustible microbianas de doble compartimento de un volumen aproximado de 2000 ml (1000 ml cada compartimento), agregando una barra de grafito previamente acondicionada en el compartimiento catódico (cátodo) y 1000 ml de solución búfer de fosfatos (10 g/L  $\text{NaHCO}_3$  y 8.5 g/L  $\text{NaH}_2\text{PO}_4$ ) como solución catolítica (oxigenando la solución de forma externa con una bomba de aire acoplada a un difusor). En el compartimento anódico se colocó una barra de grafito previamente pretratada insertada en la espuma de poliuretano recubierta con grafito en aerosol (Tabla 3), y 1000 ml de agua residual del rastro como sustrato.

**Tabla 1.** Tratamientos evaluados en las CCM.

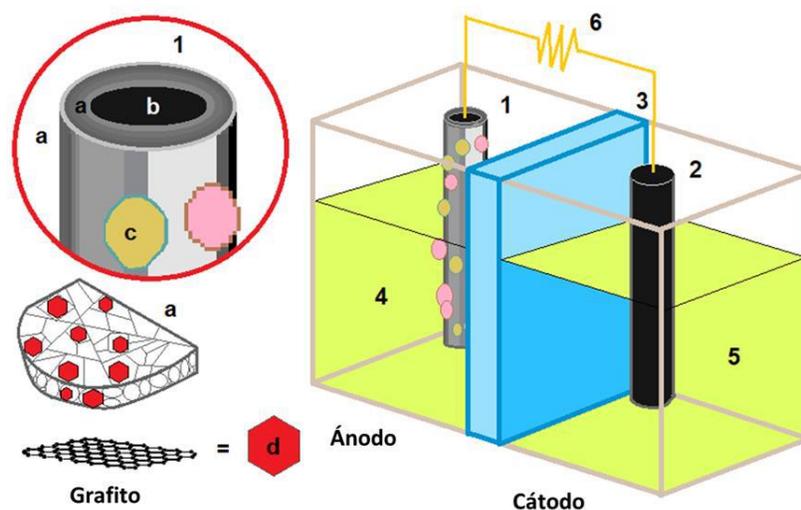
Tratamiento	Ánodo	Identificador
1	Espuma de poliuretano cubierta con grafito	PUG+BGL

---

	conectada al circuito + barra de grafito libre (en el medio)	
2	Barra de grafito conectada al circuito + espuma de poliuretano cubierta con grafito libre (en el medio)	BG+PUGL
3	Espuma de poliuretano cubierta con grafito unida a la barra de grafito y conectada al circuito	PUGBG

---

Se utilizó una membrana de intercambio catiónico pre-hidratada (NaCl 5%, 12 h) para separar los compartimentos (CMI-7000 marca International Membranes Inc.). El monitoreo de las celdas se llevó a cabo utilizando un multímetro digital (Fluke 289 - Trendcapture) con el cual se determinó el voltaje de cada celda 1 vez al día durante toda la reacción (30 días), empleando una resistencia externa de 1 K $\Omega$  para cerrar el circuito (Fig. 1). Se determinó la demanda química de oxígeno (DQO) de forma diaria.



**Figura 3.** Diagrama de la CCM utilizada en los experimentos.

## **1.5. Determinación de materia orgánica en la CCM**

La técnica para llevar a cabo la determinación de materia orgánica está basada en la Norma Mexicana NMX-AA-030-SCFI-2012.

### **1.5.1. Material y equipo**

El equipo y material usado para la determinación de la técnica fueron los siguientes: digestor termostático HACH DRB/200, espectrofotómetro HACH DR/2010, centrifuga SOLBAT J600 y micropipetas LABMATE SOFT (1/5000) (100/1000 ml). Como material de laboratorio se usaron tubos HACH con tapón de rosca, frascos ámbar de 1 litro, matraces de aforación de 1 litro y como reactivos fueron el dicromato de potasio ( $K_2Cr_2O_7$ ), Sulfato de mercurio ( $HgSO_4$ ), Sulfato de plata ( $Ag_2SO_4$ ) y biftalato de potasio ( $C_8H_5KO_4$ ).

### **1.5.2. Procedimiento**

En este apartado se describe el procedimiento para la realización de la técnica anteriormente mencionada:

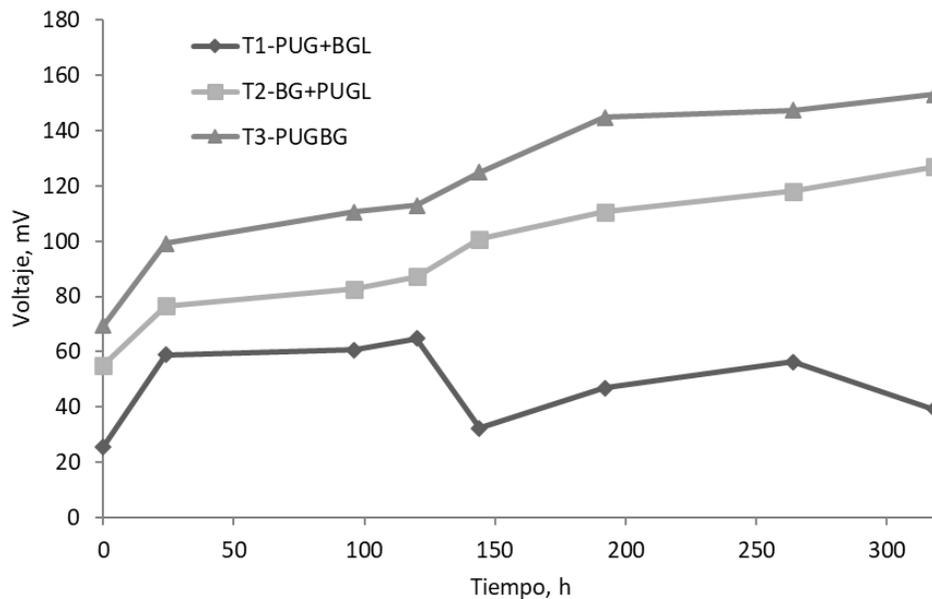
- a. En un tubo Hach se añadieron 3.5 ml de la solución de ácido plata y 1.5 ml de la solución de dicromato de potasio.
- b. Se agregaron 2.5 ml de la muestra problema y se cerró bien con el tapón de rosca; fue necesario realizar un blanco de referencia (agua destilada).
- c. Se agitó lentamente por inversión y se colocaron los tubos en el termodigestor durante 2 horas a 150°C.
- d. Los tubos se sacaron y dejaron enfriar a temperatura ambiente. Se leyó la absorbancia en el espectrofotómetro a una longitud de onda de 620 nm.
- e. Se calculó la concentración de la DQO con la curva estándar.

## CAPÍTULO III

### RESULTADOS Y DISCUSIONES

#### .1. Voltaje

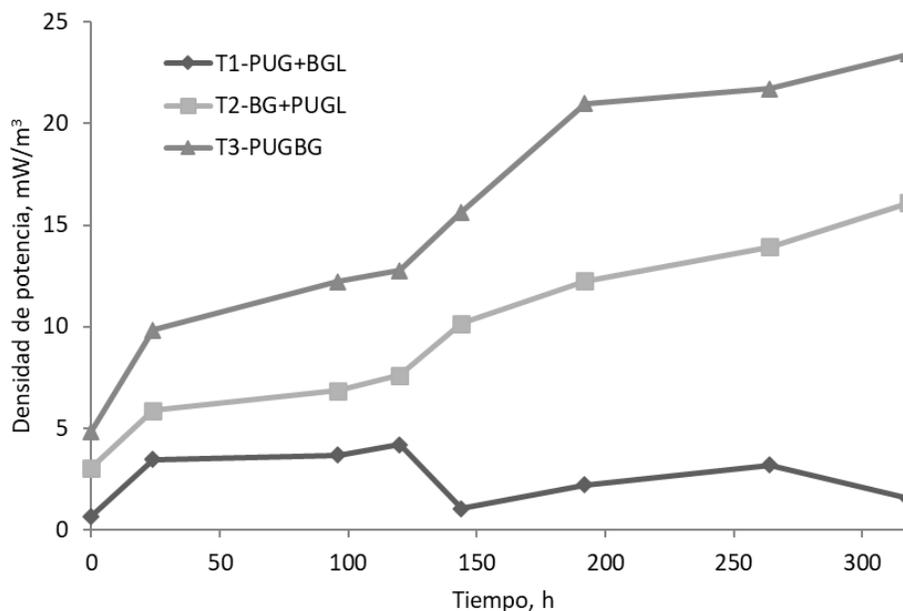
Como se muestra en la Fig. 2, el voltaje máximo generado fue de 153.1 mV, 126.9 mV y 64.8 mV correspondiente a los compósitos de PUGBG, BG+PUGL y PUG+BGL, respectivamente. Estos resultados indican que la configuración en la cual la espuma de poliuretano cubierta con grafito (PUG) se une a la barra de grafito previamente tratada y ambas son conectadas al circuito externo favorece significativamente la generación de energía eléctrica en la CCM. Esto puede atribuirse a la mayor área específica presente en el soporte (ánodo) al combinar ambos componentes previamente descritos, lo que promueve la adhesión microbiana, la oxidación de la materia orgánica y la captura de los electrones en la celda (Di Lorenzo et al., 2010).



**Figura 4.** Voltaje generado por las CCM empacadas con los compósitos de PUG+BGL, BG+PUGL y PUGBG como ánodos.

## .2. Densidad de potencia

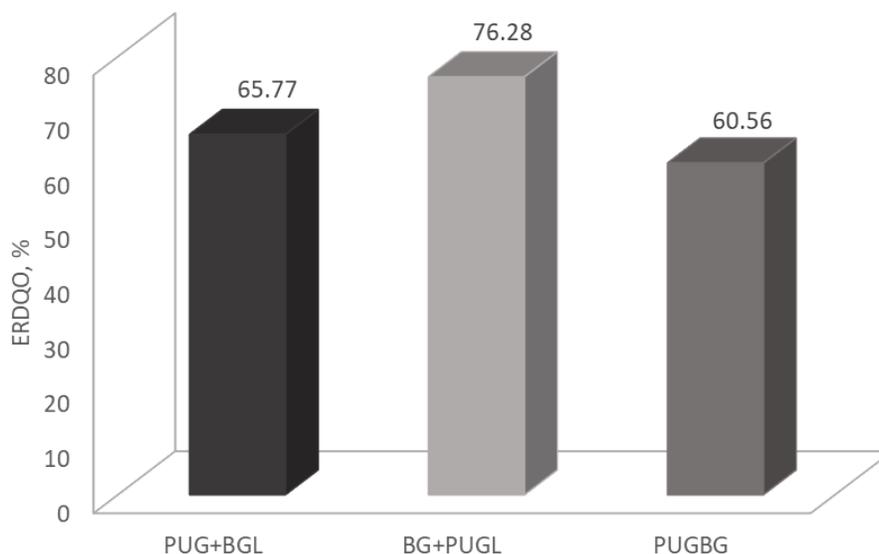
En la Fig. 3, se observa que la densidad de potencia máxima alcanzada por los ánodos de PUGBG, BG+PUGL y PUG+BGL fue de 23.44 mW/m<sup>3</sup>, 16.10 mW/m<sup>3</sup> y 1.54 mW/m<sup>3</sup>, respectivamente. El alto rendimiento observado en la configuración PUGBG puede explicarse por la sinergia entre los materiales utilizados: la espuma de poliuretano recubierta con grafito en aerosol ofrece una alta área superficial y una estructura porosa que facilita el crecimiento y desarrollo de biopelículas electroactivas, mientras que la barra de grafito, al estar conectada al circuito, asegura una eficiente recolección de electrones. Esta combinación favorece la formación de una interfase electroquímica activa y una baja resistencia interna, optimizando así el transporte de electrones hasta el circuito externo. Los resultados obtenidos son comparables a lo reportado por otros autores (32 mW/m<sup>3</sup>, Mateo-Ramírez et al., 2017; 52.94 mW/m<sup>3</sup>, Mkhwebane, 2021), lo que demuestra la capacidad de estos sistemas para producir energía eléctrica directamente aprovechable durante el tratamiento de efluentes de la industria cárnica.



**Figura 5.** Densidad de potencia generada por las CCM empacadas con los compósitos de PUG+BGL, BG+PUGL y PUGBG como ánodos.

### .3. Eficiencia en la remoción de DQO

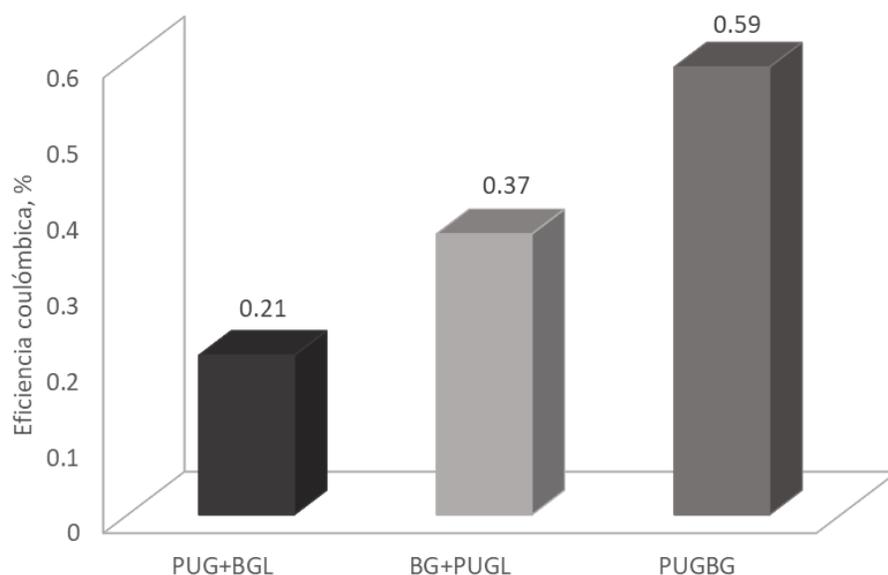
La Fig. 4 muestra la tasa de remoción de DQO en las CCM empacadas con los materiales fabricados. Se puede observar que los ánodos de BG+PUGL, PUG+BGL y PUGBG lograron remover un 76.28%, 65.77% y 60.56%, respectivamente. El mayor porcentaje de remoción alcanzado por el sistema BG+PUGL puede atribuirse a la exposición directa de la espuma de poliuretano cubierta con grafito al medio anódico sin estar conectada al circuito, lo que permitiría una mayor interacción con los microorganismos y la materia orgánica disuelta (Suberkropp, 1998). Esta configuración podría estar favoreciendo una mayor superficie de contacto para la colonización microbiana y, por lo tanto, una actividad metabólica más intensa orientada a la degradación de compuestos orgánicos (Palmowski & Müller, 2003). Estos resultados reflejan la compleja relación entre la eficiencia electroquímica (descrita previamente) y la eficiencia del tratamiento del agua residual, resaltando que una mayor producción de energía no implica necesariamente una mayor capacidad de remoción de contaminantes.



**Figura 6.** Eficiencia de remoción de DQO al final del ciclo operativo de las CCM.

#### .4. Eficiencia coulombica

La eficiencia coulombica (EC) obtenida por los ánodos fabricados a base de PUGBG, BG+PUGL y PUG+BGL fue de 0.59%, 0.37% y 0.21%, respectivamente (Fig. 5). Los resultados indican que la configuración PUGBG, además de presentar el mejor desempeño en términos de voltaje y densidad de potencia, fue también la más eficiente en la recuperación de electrones liberados durante la oxidación de la materia orgánica en el sistema. Este comportamiento podría atribuirse a la estrecha interacción entre la biopelícula electroactiva y el ánodo compuesto, lo que favorece una transferencia eficiente de electrones hacia el circuito externo y reduce las pérdidas asociadas a rutas metabólicas competitivas no generadoras de corriente, como la reducción de nitratos, sulfatos u otros aceptores terminales alternativos (Chen et al., 2021). La sinergia entre la alta área superficial de la espuma de poliuretano y la buena conductividad de la barra de grafito contribuye a optimizar el acoplamiento bioelectroquímico, lo cual se refleja en una mayor eficiencia en la conversión de la materia orgánica en energía eléctrica (Pérez-Rodríguez et al., 2016).



**Figura 7.** Eficiencia coulombica obtenida en las CCM.

## CONCLUSIÓN

En esta investigación se evaluó el desempeño de un sistema bioelectroquímico empacado con ánodos compuestos de espuma de poliuretano cubierta con grafito en aerosol y barras de grafito, durante el tratamiento de aguas residuales generadas por la industria cárnica. Los resultados obtenidos demostraron que la configuración PUGBG, en la cual ambos materiales se encuentran unidos y conectados al circuito externo, presentó el mejor rendimiento electroquímico, alcanzando un voltaje máximo de 153.1 mV, una densidad de potencia de 23.44 mW/m<sup>3</sup> y una eficiencia coulombica del 0.59%. Estos valores superan significativamente a los obtenidos en otras configuraciones, lo que evidencia la importancia del diseño del ánodo para maximizar la recuperación de energía.

Estos resultados evidencian el potencial de los materiales compuestos evaluados para ser utilizados como ánodos en celdas de combustible microbianas aplicadas al tratamiento de aguas residuales de la industria cárnica con generación simultánea de energía eléctrica. Sin embargo, también señalan la necesidad de continuar con investigaciones enfocadas en la mejora de la eficiencia coulombica, la selección de consorcios microbianos más electroactivos y la integración de estos sistemas en condiciones reales de operación para su eventual escalamiento.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar-González, M., Buitrón, G., Shimada-Miyasaka, A., & Mora-Izaguirre, O. (2016). Estado actual de los sistemas bioelectroquímicos: factibilidad de su uso para aumentar la producción ruminal de propionato. *Agrociencia*, 50(2), 149-166.
- Álvarez, M. A., & Gómez, A. L. (2015). Tratamiento de aguas residuales mediante procesos biológicos. *Revista Internacional de Tecnología y Ciencias Ambientales*, 8(2), 100-115.
- 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.
- CARRERA, R. A. C. (2018). Tratamiento de aguas residuales y producción de hidrógeno con un sistema bioelectroquímico asistido con dos diferentes membranas.
- Castañeda, M., & Ríos, L. A. (2014). Caracterización de las aguas residuales generadas en un matadero bovino y evaluación de un sistema de tratamiento anaerobio. *Revista Facultad de Ingeniería*, 73, 106-115.
- Castaño, M., & Herrera, S. (2017). Tratamientos biológicos de aguas residuales de la industria alimentaria: Aplicaciones y desafíos. En F. Jiménez (Ed.), *Avances en la gestión de aguas residuales* (pp. 105-123). Editorial Universitaria.
- Cervantes, F. J., & Gómez, J. (2011). *Biotecnología ambiental: Fundamentos y aplicaciones en el tratamiento de aguas residuales*. México: Fondo de Cultura Económica.
- Chen, W., Liu, Z., Li, Y., Xing, X., Liao, Q., & Zhu, X. (2021). Improved electricity generation, coulombic efficiency and microbial community structure of microbial fuel cells using sodium citrate as an effective additive. *Journal of Power Sources*, 482, 228947.

- DE AGUAS, A. P. E. T. (2021, October). EFICIENCIA DE UN ELECTROCOAGULADOR COMO ALTERNATIVA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE UNA INDUSTRIA ALIMENTARIA EAM-O15. In *Memorias del Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de*.
- Di Lorenzo, M., Scott, K., Curtis, T. P., & Head, I. M. (2010). Effect of increasing anode surface area on the performance of a single chamber microbial fuel cell. *Chemical Engineering Journal*, 156(1), 40-48.
- Escalona, J. J., & Gutiérrez, L. F. (2018). Aplicación de celdas de combustible microbianas para el tratamiento de aguas residuales de alto contenido orgánico. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 17(32), 119-134.
- Gadkari, S., Gu, S., & Sadhukhan, J. (2018). Towards automated design of bioelectrochemical systems: A comprehensive review of mathematical models. *Chemical Engineering Journal*, 343, 303-316.
- García, M. A., Pérez, J. L., & Rodríguez, F. B. (2020). Aplicación de sistemas bioelectroquímicos para el tratamiento de aguas residuales de rastros municipales: Transferencia de electrones y generación de bioelectricidad. *Revista de Tecnologías Ambientales*, 15(3), 45-57.
- Gasca, E. P. (2010). Evaluación de filtro anaerobio de flujo ascendente para tratar agua residual de rastro.
- González, L. (2018). Técnicas de tratamiento de aguas residuales en la industria. *Consultoría Ambiental*.
- Hamelers, H. V., Ter Heijne, A., Sleutels, T. H., Jeremiasse, A. W., Strik, D. P., & Buisman, C. J. (2010). New applications and performance of bioelectrochemical systems. *Applied microbiology and biotechnology*, 85, 1673-1685.
- Hernández, J. L., & Romero, A. M. (2015). Evaluación del impacto ambiental por vertido de aguas residuales en rastros municipales. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 14(2), 289–300.

- Kronenberg, M., Trably, E., Bernet, N., & Patureau, D. (2017). Biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons: Using microbial bioelectrochemical systems to overcome an impasse. *Environmental Pollution*, 231, 509-523.
- Logan, B. E., & Regan, J. M. (2006). Energía renovable de celdas de combustible microbianas: Conceptos y aplicaciones. *Revista Internacional de Energía y Medio Ambiente*, 1(4), 283-295.
- Logan, B. E., Rossi, R., Ragab, A. A., & Saikaly, P. E. (2019). Electroactive microorganisms in bioelectrochemical systems. *Nature Reviews Microbiology*, 17(5), 307-319.
- López, L., & Ramírez, J. (2019). Celdas de combustible microbianas: Principios, aplicaciones y perspectivas en el tratamiento de aguas residuales. *Revista de Biotecnología Ambiental*, 24(3), 134-145.
- Marqués, D. R., & López, A. L. (2019). Aplicaciones de celdas de combustible microbianas en el tratamiento de aguas residuales industriales. *Revista Latinoamericana de Ingeniería Ambiental*, 14(2), 135-144.
- Mateo-Ramírez, F., Addi, H., Hernández-Fernández, F. J., Godínez, C., Pérez de los Ríos, A., Lotfi, E. M., Mahi, M.E., & Lozano Blanco, L. J. (2017). Air breathing cathode-microbial fuel cell with separator based on ionic liquid applied to slaughterhouse wastewater treatment and bio-energy production. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 92(3), 642-648.
- Metcalf & Eddy, Inc. (2004). *Ingeniería de aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización* (4.ª ed., G. Tchobanoglous, trad.). McGraw-Hill Interamericana.
- Metcalf & Eddy, Inc., Tchobanoglous, G., Burton, F. L., & Stensel, H. D. (2003). *Tratamiento de aguas residuales. Principios y diseño* (2.ª ed.). McGraw-Hill Interamericana.
- Mkhwebane, S. E. (2021). Evaluation of electricity generation using Microbial Fuel Cell technology for abattoir wastewater treatment.

- Palmowski, L. M., & Müller, J. A. (2003). Anaerobic degradation of organic materials-significance of the substrate surface area. *Water science and technology*, 47(12), 231-238.
- Pérez-Padilla, G., & López-Torres, M. A. (2010). Manejo y tratamiento de aguas residuales en rastros municipales. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC).
- Pérez-Rodríguez, P., Martínez-Amador, S. Y., Valdez-Aguilar, L. A., Benavides-Mendoza, A., Rodríguez-de la Garza, J. A., & Ovando-Medina, V. M. (2018). Diseño y evaluación de un sistema secuencial bioelectroquímico para el tratamiento de agua residual municipal y generación de voltaje. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 17(1), 145-154.
- Pérez-Rodríguez, P., Ovando-Medina, V. M., Martínez-Amador, S. Y., & Rodríguez-de la Garza, J. A. (2016). Bioanode of polyurethane/graphite/polypyrrole composite in microbial fuel cells. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 21, 305-313.
- Rodríguez, M. A., & Herrera, A. (2012). Caracterización de aguas residuales en rastros municipales. *Revista Ingeniería Ambiental*, 9(1), 45–52.
- Romero, G. (2018). Aplicación de celdas de combustible microbianas en el tratamiento de aguas residuales de la industria cárnica. *Revista Latinoamericana de Biotecnología y Ciencias Ambientales*, 9(4), 215-230.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2010). Guía para el manejo y tratamiento de aguas residuales en rastros municipales.
- Suberkropp, K. (1998). Microorganisms and organic matter decomposition. *River ecology and management: lessons from the Pacific coastal ecoregion*, 120-143.
- Villanueva, R., & Medina, J. (2015). Tratamientos terciarios de aguas residuales: Tecnologías emergentes. *Revista de Ciencia y Tecnología Ambiental*, 10(2), 60-75.

Wilberforce, T., Sayed, E. T., Abdelkareem, M. A., Elsaid, K., & Olabi, A. G. (2021). Value added products from wastewater using bioelectrochemical systems: Current trends and perspectives. *Journal of Water Process Engineering*, 39, 101737.

Zhang, X., Li, X., Zhao, X., & Li, Y. (2019). Factors affecting the efficiency of a bioelectrochemical system: a review. *RSC advances*, 9(34), 19748-19761.