

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



Generación de voltaje y tratamiento de nejayote en celdas de combustible microbianas empacadas con ánodos de poliuretano, grafito y nanofibras de carbono.

Por:

ZURY SADAY JUSTO ANTONIO

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL

Saltillo, Coahuila, México

Diciembre de 2024

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO

Generación de voltaje y tratamiento de nejayote en celdas de combustible microbianas empacadas con ánodos de poliuretano, grafito y nanofibras de carbono.

Por:

ZURY SADAY JUSTO ANTONIO

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. José Antonio Rodríguez de la Garza

Asesor Principal Externo


Dra. Silvia Yudith Martínez Amador

Coasesor


M.C. Etelberto Cortez Quevedo

Coasesor

Saltillo, Coahuila, México.

Diciembre de 2024

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

Generación de voltaje y tratamiento de nejayote en celdas de combustible microbianas empacadas con ánodos de poliuretano, grafito y nanofibras de carbono.

Por:

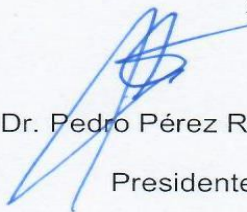
ZURY SADAY JUSTO ANTONIO

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



M.C. Eteberto Cortez Quevedo

Vocal


Dr. José Antonio Rodríguez de la Garza

Vocal suplente




M.C. Sergio Sánchez Martínez

Coordinador de la División de Ingeniería

Saltillo Coahuila, México.

Diciembre de 2024

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:

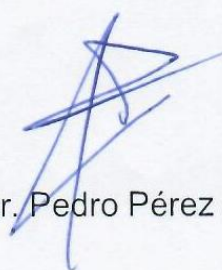
Reproducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (cortar y pegar); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (auto plagio); comprar, robar o pedir prestados los datos o la tesis para presentarla como propia; omitir referencias 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 principal



Zury Saday Justo Antonio

Asesor principal



Dr. Pedro Pérez Rodríguez

DEDICATORIA

Hoy concluye una de las etapas más importantes en mi vida, este proyecto está dedicado a todas aquellas personas que formaron parte de mi vida estudiantil.

A Dios por darme el privilegio de la vida, por iluminarme y bendecirme en todo momento, por estar conmigo en cada paso y decisión que tome a lo largo de mi etapa como estudiante.

A mis padres María Antonio Antonio y Abraham Justo primero que nada dándole gracias a Dios por sus vidas. Gracias por todo el inmenso esfuerzo que hicieron desde el momento que decidí estudiar, siempre dándome lo mejor, trabajando arduamente, y sin importan el cansancio físico y mental o con alguna preocupación siempre estuvieron al pendiente de mí, no hay palabras suficientes que definan mi agradecimiento hacia mis queridos padres, no solo por el apoyo en mi vida profesional sino también en el ámbito deportivo y como persona, siempre me han demostrado que todo se puede en esta vida, este logro definitivamente es para ustedes dos porque sin su apoyo esto no hubiera sido posible, los amo con todo mi corazón.

A mis hermanos por siempre alegrar mis días aun estando lejos de casa, por estar en los momentos buenos y malos, siempre he estado agradecida con Dios por la presencia de cada uno de ustedes en mi vida.

A mis tíos que estuvieron conmigo en una etapa difícil e importante, siempre estaré agradecida por todos los buenos consejos que me brindaron.

A mis sobrinos espero que esto sea un ejemplo de superación tanto en la vida personal como profesional.

A mis abuelitos por su cariño, amor y apoyo incondicional.

A mis primos por el cariño incondicional, porque de una u otra manera estuvieron presentes en mi vida de estudiante.

A mis compañeros de clases, deporte y amigos que hice en la Universidad.

AGRADECIMIENTOS

A mi *Alma Mater*, la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro por brindarme la oportunidad de formarme a nivel profesional. Por ser una institución llena de oportunidades y por enriquecerme de conocimiento y sobre todo por darme los mejores años de mi vida acompañada de mis amigos.

A los maestros del departamento de Ciencias del Suelo por brindarme la enseñanza durante toda la carrera y en mi formación profesional.

A mi asesor de tesis el Dr. Pedro Pérez Rodríguez por darme la oportunidad para el desarrollo del presente, gracias por el apoyo brindado en mi formación académica, por su colaboración, dedicación y valiosas aportaciones con profesionalismo y ética.

A mi Asesor externo el Dr. José Antonio Rodríguez de la Garza por el apoyo y aportaciones durante el desarrollo del presente.

A mis Coasesores la Dra. Silvia Yudith Martínez Amador y al M.C. Etelberto Cortez Quevedo por su valiosa colaboración y asesoría del presente.

Al Dr. José Antonio Hernández Herrera por su paciencia y por brindarme los conocimientos necesarios en mi desarrollo personal y profesional. Así como su apoyo incondicional en el área laboral fuera de la universidad.

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA.....	5
AGRADECIMIENTOS	6
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	7
ÍNDICE DE FIGURAS	9
ÍNDICE DE TABLAS	10
ABREVIATURAS.....	11
RESUMEN	12
INTRODUCCIÓN	13
OBJETIVO GENERAL	14
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
HIPÓTESIS	15
CAPÍTULO I	16
REVISIÓN DE LITERATURA	16
1.1 Industria del maíz.....	16
1.2 La industria del nixtamal	16
1.2.1 Definición de nixtamalizado	17
1.2.2 Características de los residuos del nixtamal.....	17
1.3 Tecnologías del tratamiento de aguas residuales	18
1.3.1 Tecnologías físicas	19
1.3.2 Tecnologías químicas	20
1.3.3 Tecnologías biológicas	21
1.3.4 Tecnologías innovadoras.....	22
1.3.4.1 Sistemas bioelectroquímicos	22

1.4 Componentes de las CCM	24
1.4.1 Electroodos	24
1.5 Membrana de intercambio catiónico	24
1.6 Sustrato.....	27
1.7 Solución catódica	28
1.8 Condiciones operacionales de las CCM	29
1.8.1 Temperatura.....	29
1.8.2 pH	30
1.8.3 Concentraciones de materia orgánica.....	30
CAPITULO II	31
MATERIALES Y MÉTODOS	31
2.1 Ubicación del experimento	31
2.2 Materiales	31
2.3 Síntesis de los compósitos de PU/Grafito	31
2.4 Fabricación y operación de las celdas de combustible microbianas	32
CAPITULO III	35
RESULTADOS Y DISCUSIONES	35
3.1 Voltaje	35
3.2 Densidad de potencia	36
3.3 Eficiencia de remoción de DQO	39
3.4 Eficiencia coulombica.....	40
CONCLUSIÓN	43
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Diagrama de celda de combustible microbianas (CCM)	34
Figura 2 Generación de voltaje en la CCM	35
Figura 3 Densidad de potencia volumétrica generada en la CCM	37
Figura 4 Eficiencia de remoción de DQO	39
Figura 5 Eficiencia coulombica (%) en el primer ciclo	41

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características de los residuos del nixtamal	17
Tabla 2. Clasificación y tipos de materiales separadores.....	25
Tabla 3. Sustratos utilizados por diversas investigaciones	28
Tabla 4. Características fisicoquímicas del nejayote.....	32
Tabla 5. Tipos de tratamientos usados durante el experimento	34
Tabla 6. Análisis comparativo de densidades de potencia obtenidos en estudios similares a lo realizado en este trabajo	38
Tabla 7. Análisis comparativo de reducción de DQO obtenidos en estudios similares a lo realizado en este trabajo	40
Tabla 8. Análisis comparativo de EC obtenidos en estudios similares a lo realizado en este trabajo	42

ABREVIATURAS

°C	Grados centígrados
AEM	Membrana de intercambio aniónico (por sus siglas en ingles)
AT	Alcalinidad total
BES	Sistemas bioelectroquímicos (por sus siglas en inglés)
BPM	Membrana bipolar (por sus siglas en ingles)
CCM	Celdas de combustible microbianas
CDM	Celdas de desalinización microbianas
CE	Conductividad eléctrica
CEM	Celdas de electrolisis microbianas
CNF	Nanofibras de carbono (por sus siglas en inglés)
Cu	Cobre
DBO ₅	Demanda bioquímica de oxígeno
DQO	Demanda química de oxígeno
EC	Eficiencia coulombica
Fe	Hierro
g	Gramos
m ³	Metro cúbico
mg/L	Miligramos por litro
MIC	Membrana de intercambio cationico
MIP	membrana de intercambio de protones
mL	Mililitros
NMX	Norma mexicana
NOM	Norma oficial mexicana
pH	Potencia de hidrógeno
ppm	Partes por millón
PU	Poliuretano
ST	Sólidos totales

RESUMEN

La falta de regulación y tecnologías accesibles para tratar el residuo de nejayote amplifica su impacto al ambiente, especialmente en regiones donde el maíz es un producto básico. El objetivo de la investigación fue evaluar la generación de voltaje y la degradación de la materia orgánica en CCM alimentadas con nejayote como sustrato. Se emplearon celdas de combustible microbianas (CCM) a escala laboratorio con un volumen total de 2000 mL. Las celdas contaron con dos compartimientos con un volumen aproximado de 1000 mL separadas por una membrana de intercambio catiónico, agregando una pieza de fieltro de grafito en el compartimiento catódico y 1000 mL de agua como solución catolítica (oxigenando la solución de forma externa con una bomba de aire acoplada a un difusor). En el compartimiento anódico se colocó uno de los soportes de PU, PU/Grafito 1% y PU/CNF 1% y 1000 mL de agua de nejayote como sustrato. El T₂ (PU/Grafito 1%) produjo los mejores resultados observando una remoción de DQO y una densidad de potencia volumétrica de 44.11 % y 0.096 mW/m³, respectivamente. Los resultados demostraron que el uso de ánodos de poliuretano, grafito y nanofibras de carbono en celdas de combustible microbianas promueve la remoción de materia orgánica y la generación de energía eléctrica durante el tratamiento de nejayote.

INTRODUCCIÓN

La industria del maíz enfrenta diversas problemáticas, entre las cuales se destaca un significativo impacto ambiental derivado del nejayote, un residuo líquido tóxico producido durante el proceso de nixtamalización. Este subproducto no solo contamina cuerpos de agua, sino que también afecta la biota acuática.

Actualmente, existen tecnologías avanzadas que permiten un tratamiento adecuado de este residuo, entre las que se encuentran las celdas de combustible microbianas (CCM). Estos dispositivos emplean microorganismos para convertir la energía química almacenada en la materia orgánica en energía eléctrica, lo que permite la recuperación de nutrientes valiosos y la mitigación del impacto ambiental, posicionándolas como una alternativa más sostenible y respetuosa con el medio ambiente.

Las CCM son sistemas de conversión de energía que integran combustible y oxígeno para generar electricidad de manera directa. Estas celdas de combustible ofrecen una eficiencia superior en comparación con tecnologías convencionales y promueven cero emisiones, representando una solución innovadora para la gestión de residuos en la industria del maíz.

Adicionalmente, la implementación de tecnologías como las CCM no solo contribuye a la reducción de la contaminación, sino que también promueve la economía circular en el sector agroindustrial. Al transformar un residuo problemático en una fuente de energía y nutrientes, se fomenta la sostenibilidad y se optimizan los recursos disponibles. Este enfoque integral permite a los productores de maíz adoptar prácticas más responsables, alineadas con los objetivos de desarrollo sostenible y la preservación del medio ambiente.

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la generación de voltaje y la degradación de materia orgánica en celdas de combustible microbianas empacadas con ánodos de poliuretano, grafito y nanofibras de carbono utilizando nejayote como sustrato.

Objetivos específicos.

1. Sintetizar ánodos de poliuretano/grafito y poliuretano/nanofibras de carbono.
2. Construir y acondicionar los sistemas bioelectroquímicos.
3. Evaluar la generación de voltaje en las celdas de combustible microbianas.
4. Cuantificar la remoción de materia orgánica en los sistemas bioelectroquímicos.

HIPÓTESIS

El uso de ánodos de poliuretano, grafito y nanofibras de carbono en celdas de combustible microbianas escala laboratorio, promoverá la remoción de materia orgánica y la generación de energía eléctrica durante el tratamiento de una muestra de nejayote.

CAPÍTULO I

REVISIÓN DE LITERATURA

1.1 Industria del maíz

El maíz es uno de los principales cereales cultivados a nivel mundial debido a sus cualidades alimenticias para la producción de proteína animal, el consumo humano y uso industrial; por lo que, es representativo en el mercado mundial (Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura, 2016).

La relación entre los mexicanos y el maíz es milenaria y está íntimamente asociada a la evolución de las civilizaciones mesoamericanas; desde su domesticación ha constituido la base de nuestra alimentación, su uso se diversifica desde granos y forraje, los cuales constituyen la base para la elaboración de bastos alimentos, hasta la industria farmacéutica y manufacturera. Se estima que existen más de 4 mil productos asociados al maíz (almidón, fructuosa, aceites, cartón, chocolates, biocombustible, alimento animal) (Venegas, 2016).

1.2 La industria del nixtamal

A mediados del siglo XIX que comenzaron a desarrollarse en México innovaciones en torno a la molienda del maíz nixtamalizado y se establecieron los primeros molinos. De la mano de la innovación, los molinos de nixtamal comenzaron a tener una amplia difusión a partir de la década de 1890, cuando ya se habían incorporado en ellos diversos perfeccionamientos que mejoraron la calidad de la masa y redujeron los costos de producción (Galvarriato, 2022).

Sin embargo, la nixtamalización hizo más difícil mecanizar la molienda, pues significaba moler una sustancia húmeda. Los molinos que se desarrollaron en Europa y el Medio Oriente para moler granos secos y que llegaron a América a partir del siglo XVI no servían para ese propósito, por lo que la molienda de nixtamal continuó realizándose con el método manual (Gómez, 2008; Sánchez, 1980).

1.2.1 Definición de nixtamalizado

La nixtamalización es un proceso tradicional que consiste en una cocción alcalina del grano de maíz, reposo, enjuagar y moler. La palabra nixtamalización proviene del náhuatl nextli, cal de cenizas, y tamalli, masa cocida de maíz; “ceniza y masa”.

La nixtamalización es un proceso tradicional que comienza cuando se cuece el grano de maíz con cal (cal al 1% a una proporción de maíz) durante 40 a 90 minutos. Una vez cocida se deja en reposo en el agua de cocción de 8 a 18 horas, para que los granos se suavicen y aflojen la cáscara. Finalmente se muele el nixtamal en molino o metate para obtener la masa (Figuroa, 2010). En algunos lugares, se suele hacer nixtamal con la ceniza obtenida de las brasas del fogón o tequesquite (Ruiz, 2022).

1.2.2 Características de los residuos del nixtamal

El agua residual generada durante el proceso de nixtamalización es conocida como nejayote. Se encuentra compuesto por un 92% a 94% de agua y un 6% a 8% de residuos de maíz, entre los que figuran las partes del pericarpio, endospermo, germen, carotenoides (pigmentos responsables del color amarillo del nejayote), y el calcio (Velazco et al., 1997). En la tabla 2. se muestran las características del nejayote según diversos autores.

Tabla 1. Características del Nejayote según diversos autores

Características	Unidades	Valores reportados	Referencias
pH	-	11.6, 6.2 y 11.0	Martinez, 1984; Rosentrater et al., 1999; Ibarra et al, 2008.
Densidad	Kg/m ³	1,047.3 y 1,003.5	Rosentrater et al., 1999; Ibarra et al.,

DQO (Demanda Química de Oxígeno)	mg O ₂ /L	13, 650.0 y 40, 058.1	2008; Valderrama et al., 2013. Martinez, 1984; Rosentrater et al., 1999; Ibarra et al., 2008; Valderrama et al., 2013.
ST (Solidos Totales)	mg/L	13, 310.0	Martinez, 1984
DBO₅ (Demanda Bioquímica de Oxígeno)	mg O ₂ /L	7,875.0 y 14,218.7	Valderrama et al., 2013
AT (Alcalinidad Total)	mg CaCO ₃ /L	3,260.0	Martinez, 1984
Calcio	mg/L	1,526.1	Valderrama et al., 2013
Fosforo	mg/L	27	Martinez, 1984
N-Kjeldah (Base seca)	% b.s	118	Martinez, 1984
Lignina (Base seca)	% b.s.	0.67	Rosentrater et al., 1999
Proteína (Base seca)	% b.s	4.9	Rosentrater et al., 1999

1.3 Tecnologías del tratamiento de aguas residuales

El objetivo principal del tratamiento de aguas residuales es reducir significativamente la carga de nutrientes al nivel mínimo antes de su descarga (Liu et al., 2020) lo anterior de acuerdo a los límites permisibles establecidos en cada país y/o normas internacionales aplicadas a los recursos hídricos. De acuerdo a las normas mexicanas vigentes, tal como la Norma Oficial Mexicana NOM-002-ECOL1996 (Diario Oficial de la Federación, 1998) ha sido establecido que los

principales parámetros de aguas residuales descargadas son la temperatura, pH, alcalinidad, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos, sólidos totales, demanda química de oxígeno, nitrógeno total y fósforo total.

Existen dos grandes grupos, los tratamientos fisicoquímicos y los biológicos. Los primeros hacen uso, como su nombre lo indica, de procesos físicos y procesos químicos. El segundo tipo involucra la degradación o transformación del material orgánico por medio de microorganismos. Dentro de los sistemas biológicos existen los sistemas aerobios (requieren oxígeno molecular disuelto) y los anaerobios (funcionan sin oxígeno) (Noyola et al., 2013).

1.3.1 Tecnologías físicas

- Electrocoagulación: Es un proceso fisicoquímico en el cual la generación *in situ* de un catión metálico desestabiliza la doble capa eléctrica de la materia coloidal que se encuentre en el sistema, logrando precipitar la materia orgánica con el respectivo hidróxido del catión metálico. El uso de la electrocoagulación en el tratamiento de efluentes es muy utilizado ya que es capaz de remover materia orgánica resistente y tan contaminante como lo son antibióticos de uso humano e incluso de recurrencia veterinaria que están presentes en efluentes de aguas residuales (Wojciech & Ewa, 2018).
- Filtración: Es un proceso de separación y eliminación de partículas sólidas y otras impurezas, como el color y el sabor, del agua. Esto se logra haciendo pasar el agua a través de un medio poroso. Existen varios métodos de filtración, incluidas la filtración lenta por arena, la filtración rápida por arena, la filtración por membranas y más (Sela, 2020).
- Sedimentación: Su objetivo primario es separar en forma de flóculos, la biomasa microbiana que crece durante el proceso de bio-oxidación, permitiendo de ese modo la clarificación del efluente del reactor biológico, previo su vertimiento final (Menéndez, 2022).
- Floculación: El proceso de floculación es por el cual las partículas desestabilizadas son inducidas a coagular (partículas inferiores a 1 μm) por medio de la eliminación o neutralización de las fuerzas de repulsión entre

partículas y por consiguiente éstas se aglutinen en partículas de mayor tamaño. Para ello, se utiliza un coagulante que elimina la doble capa eléctrica mencionada anteriormente. El cual favorece el crecimiento de flóculos neutralizados o por otro lado se introduce energía, en forma de agitación, que hace que estos impacten entre sí y se adhieran. La floculación de partículas suspendidas se puede atribuir a cuatro mecanismos de coagulación, 1) neutralización de las cargas, 2) mecanismos de parche electrostático, 3) Bridging (puenteo) y 4) floculación por barrido. Por otro lado, la floculación se puede clasificar en cinco tipos, dependiendo de cómo se induzca dicha floculación, ya sea por medio de sistemas mecánicos, natural o por la adición de algún compuesto químico o bioquímico: Floculación química, auto floculación, método de floculación física, floculación biológica y floculación inducida por modificación genética (Camacho, 2015).

- Filtración por membrana: La aplicación de membranas para el tratamiento de aguas ha aumentado considerablemente. Una de las grandes ventajas que presentan estos sistemas de filtración es que son capaces de retener un gran número de sustancias contaminantes en las aguas, entre ellos los COEs (Contaminantes orgánicos emergentes); sin embargo, no permiten la degradación de las mismas, por lo que dichos contaminantes se concentran en forma de residuos sólidos, requiriendo de un tratamiento adicional posterior, y, por tanto, encareciendo los costos del proceso (Homem & Santos, 2011).

1.3.2 Tecnologías químicas

- Procesos de oxidación avanzada (POAs): Se caracterizan por aprovechar la alta reactividad del radical hidroxilo (OH^\cdot) como agente oxidante (no confundir el radical con el ion hidroxilo, OH) para oxidar la materia orgánica disuelta en el agua hasta su mineralización. En otras palabras, los POA son procesos de oxidación de la materia orgánica a través de los radicales hidroxilos hasta convertirla en dióxido de carbono y agua o al menos en compuestos menos peligrosos (Pinos , 2018).

- **Tratamientos electroquímicos:** la desinfección electroquímica del agua es un proceso en el que los electrones suministrados por la corriente continua reaccionan con iones y moléculas en el agua. El requisito básico para el proceso es una fuente de alimentación y dos electrodos, un ánodo y un cátodo. Basado en los materiales del electrodo, la corriente aplicada y la composición del agua, varios procesos redox tienen lugar a diferentes velocidades (Flemming et al., 2020).
- **Precipitación química:** Se utiliza principalmente para la eliminación de cationes metálicos, pero también para la eliminación de aniones como fluoruro, cianuro y fosfato, así como moléculas orgánicas como la precipitación de fenoles y aminas aromáticas por enzimas, detergentes y emulsiones oleosas por cloruro de bario. Es importante tener en cuenta que la precipitación es un proceso mediante el cual se eliminan sustancia disuelta no deseables, por adición de una sustancia que forme un compuesto insoluble con el mismo, facilitando así su eliminación por cualquiera de los métodos para la eliminación de la materia en suspensión los cuales son desbaste, sedimentación, filtración, flotación, y coagulación-floculación (Wang et al., 2005).

1.3.3 Tecnologías biológicas

- **Lodos activados:** Es una suspensión de biomasa bacteriana (el lodo activado) es responsable de la remoción de los contaminantes. Dependiendo del diseño y la aplicación específica, una planta de tratamiento de aguas residuales de lodos activados puede lograr la remoción biológica de nitrógeno y fósforo, además de la remoción de sustancias ricas en carbono orgánico (Gernaey et al., 2004).
- **Lagunas de oxidación:** Este proceso es una combinación de sedimentación, digestión y conversión de desechos orgánicos por bacterias y algas, por lo que generan su propia reproducción, que puede ser anaerobia, aerobia o una combinación de ambas. Las lagunas de estabilización se clasifican en anaerobias facultativas y aerobias o de pulimento; su objetivo principal es la

eliminación de contaminantes: demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y coliformes fecales (CONAGUA, 2007).

- Digestión anaerobia: Se trata de una fermentación microbiana en ausencia de oxígeno que da lugar a una mezcla de gases (principalmente metano y dióxido de carbono), conocida como "biogás" y a una suspensión acuosa o "lodo" que contiene los microorganismos responsables de la degradación de la materia orgánica (Lorenzo & Obaya, 2005)
- Filtros biológicos: Es un proceso que pone en contacto aguas residuales con biomasa adherida a un medio de soporte fijo, constituyendo un lecho de oxidación biológica. Tiene como objetivo reducir la carga orgánica existente en aguas residuales domésticas o industriales. Consiste en un lecho natural, sobre el cual se aplican las aguas residuales, con el consecuente crecimiento de microorganismos, lamas o películas microbiales sobre el lecho. El lecho del filtro biológico consiste en un medio altamente permeable, al cual se adhiere los microorganismos y a través del cual el residuo líquido se infiltra (Romero, 2010).

1.3.4 Tecnologías innovadoras

1.3.4.1 Sistemas bioelectroquímicos

Los sistemas bioelectroquímicos (BES, por sus siglas en inglés) se basan en la capacidad de algunos microorganismos para catalizar diferentes reacciones electroquímicas, específicamente, reacciones que involucren una transferencia de electrones. Estos sistemas pueden dividirse en:

- Celdas de combustible microbianas (CCM)

Las celdas de combustible microbianas son dispositivos que utilizan bacterias para oxidar materia orgánica e inorgánica y generar energía. Las bacterias metabolizan el sustrato presente en dichos dispositivos y como producto de este metabolismo se obtiene electrones que son transferidos a un aceptor final que corresponde con el ánodo. El ánodo y cátodo están unidos por un material conductor y una resistencia que permite el paso de los electrones para cerrar el circuito eléctrico. Al mismo tiempo, durante ese proceso se contribuye a degradar la materia orgánica representada como sustrato o combustible (Revelo et al., 2013).

- Celdas de electrólisis microbianas (CEM)

Las CEM son un tipo de sistema bioelectroquímicos al que se le proporciona energía eléctrica para lograr un determinado proceso o la formación de productos químicos principalmente inorgánicos como el hidrógeno, el peróxido de hidrógeno, el hidróxido de sodio, y otros (Logan, 2008). Funcionan de manera parecida a una CCM, ya que son la modificación de éstas, y son diseñadas para producir H₂ (Liu & Logan, 2005). El sistema consiste en utilizar los electrones que llegan al cátodo, como ocurre en un CCM, pero con la finalidad de combinarse con los protones para producir H₂, por lo tanto, este sistema debe de estar en anaerobiosis para que los electrones y protones no se combinen con el oxígeno. Esta reacción no se produce espontáneamente, necesita de una cantidad de energía externa y la generada por las bacterias para llevar a cabo la reacción (Logan & Grot, 2006). El voltaje o diferencia de potencial, es la presión o la fuerza con la que se empuja a los electrones para que lleguen al cátodo, y se administra a través de una fuente de poder de corriente directa o de un potencióstato. Los cálculos para determinar el voltaje que se necesita se basan en la energía libre de Gibbs de la reacción redox (Call & Logan, 2008; Logan et al., 2018; Rozendal et al., 2008).

- Celdas de desalinización microbianas

Las CDM trabajan mediante un sistema de ósmosis inversa, funciona mediante el siguiente mecanismo: en su núcleo, esta tecnología aprovecha la capacidad natural de ciertos microorganismos para desalinizar el agua, en el proceso inicial, el agua salobre es conducida a través de membranas biológicas, donde bacterias específicas trabajan activamente para metabolizar y reducir la salinidad, este proceso biológico, constituye la primera fase de purificación, como resultado, el agua tratada sale de esta etapa con una significativa reducción de salinidad. Posteriormente, el agua tratada pasa a través de un sistema de ósmosis inversa, una tecnología consolidada que utiliza membranas semipermeables para eliminar los iones de sal residuales y otras impurezas, asegurando una calidad de agua óptima y potable. Sin embargo, durante este proceso, se genera un subproducto denominado "desecho salino", este desecho, contiene la concentración más alta de

sales y otros compuestos no deseados, se aparta del agua purificada y debe ser gestionado de manera adecuada para prevenir impactos negativos en el entorno circundante. Además de desalinizar el agua, generan energía y simultáneamente contribuyen a la disminución de DQO cuando este es alto en las fuentes hídricas (Chaparro, 2020).

1.4 Componentes de las CCM

Una CCM típicamente está compuesta por dos cámaras, una anaeróbica y otra aeróbica en medio de las cuales hay un separador (Min et al., 2005). La cámara anaeróbica contiene sustratos orgánicos que, al oxidarse por acción de los microorganismos, generan electrones, protones y CO₂. En cada una de las cámaras se coloca un electrodo, el ánodo en la cámara anaeróbica y el cátodo en la cámara aeróbica (Du et al., 2007) una vez los electrones se liberan en la cámara anódica, éstos son captados por el ánodo y posteriormente transferidos hacia el cátodo mediante un circuito externo. Simultáneamente, en la cámara anódica se generan protones que migran hacia la cámara catódica a través del separador (Li et al., 2011), donde se combinan con el oxígeno del aire para reducirse a agua con los electrones que captan directamente del cátodo, debido a que esta reacción no está catalizada por microorganismos el cátodo se refiere como abiótico.

1.4.1 Electrodo

El ánodo puede ser estructurado de varios tipos de materiales, los más usados son: compuestos de carbón que son muy útiles por su durabilidad, alta conductividad, biocompatibilidad y bajo costo (Li et al., 2017). El cátodo también puede estar constituido de diversos materiales, en su mayoría se usan componentes similares a los descritos en el ánodo tales como grafito, estructuras de carbono, incluso porcelana (Du et al., 2007) ,aunque existe un interés creciente en estructuras más innovadoras, bajo este concepto se ha usado el platino (Pt) el cual es favorable en la reducción del oxígeno, lastimosamente este metal es demasiado costoso, además que su rendimiento decae debido a que provoca un envenenamiento al entorno bacteriano (Zhou et al., 2011).

1.5 Membrana de intercambio catiónico

Para evitar que el oxígeno (o cualquier otro agente oxidante) compita con el ánodo como aceptor final de electrones, se establece una membrana o separador que establece dos zonas claramente diferenciadas; la cámara anódica donde los microorganismos crecen, y la cámara catódica donde los electrones reaccionan con el agente oxidante (Logan, 2008).

Tabla 2. Clasificación y tipos de materiales separadores.

Clasificación	Tipo	Autor
Membranas de Intercambio Iónico (IEM)	Membrana de Intercambio Catiónico (CEM) Membrana de Intercambio Aniónico (AEM) Membrana Bipolar (BPM)	Wei et al., 2011
Separadores de tamaño selectivo	Membrana de filtración microporosa Filtros de poro ancho	

- Membranas de intercambio catiónico (CEM): Son las membranas por excelencia empleadas en las CCM. Con frecuencia se les denomina membranas de intercambio protónicas, al igual que el resto de membranas su principal labor es la de separar las cámaras aeróbica y anaeróbica mientras los iones pasan a través de ella. Entre las características más importantes que deben de tener las MIP están: una alta conductividad de protones, baja difusividad de oxígeno y estabilidad bioquímica (Kumar et al., 2018). Captan los protones producidos por la acción microbiana, mientras que los electrones fluyen por medio de un circuito externo y terminan en el oxígeno como su aceptor final, completando el circuito (Hoskins et al., 2014).

- Membrana de intercambio aniónico (MIA): Es un tipo de membrana de intercambio iónico que tiene grupos funcionales ionizables, se origina con el afán de solventar las limitaciones de las membranas catiónicas, esta membrana usa buffers para incrementar el flujo de protones (Zhuang et al., 2012). Las MIA en su mayoría están constituidas de carbono y han demostrado que con una misma superficie que las MIC han tenido mayor recuperación de electrones, además que presentan costos inferiores a otras usadas, estas membranas junto con cátodos tubulares de menor resistencia interna se convierten en futuros prósperos en la evaluación del funcionamiento de CCM (Zou et al., 2008).
- Las membranas bipolares (MB): Son la sumatoria de dos membranas monopolares, se constituyen en una variante de los separadores comunes usados en CCM, en donde los protones son conducidos junto con iones hidróxido (Rahimnejad et al., 2015). Según los estudios de Salwan (2009), este tipo de membranas incrementa la conductividad eléctrica y reduce su costo. Entre los materiales más estudiados para este tipo de membranas están el grafito y placas de acero inoxidable; el grafito provee resistencia además de una excelente conductividad eléctrica, junto con su fácil obtención y baja densidad es una de las mejores alternativas; mientras que el acero inoxidable aparte de cualidades similares del grafito brinda estabilidad química. De acuerdo a Mehta & Cooper (2003), las principales ventajas de este tipo de membrana radican en poder separar dos celdas individuales adyacentes, ayuda en el paso de corriente por fuera de la celda, distribuye los oxidantes contenidos en el interior de la celda y finalmente colabora en la gestión del calor y agua en el interior de la calda.
- Membranas selectivas por tamaño: Las membranas ionoméricas simples desdoblan el pH a ambos lados de la membrana ya que no son selectivas para protones y cationes. Comparados con estas, los separadores selectivos por tamaño no distinguen entre iones y tienen un tamaño de poro que facilita la transferencia de carga. Atendiendo al tamaño de poro los clasificamos en dos grupos: membranas de filtración microporosa, considerando tanto

microfiltración (MFM) como ultrafiltración (UFM), y materiales filtrantes de poro variable (Bernal et al., 2012).

- Membrana de filtración microporosa: Aunque estas membranas se han considerado para su aplicación en CCM sobre todo han sido empleadas como separadores en sistemas de tratamiento de aguas residuales puesto que ofrecen un buen rendimiento en cuanto a filtración, además, presentan una alta durabilidad y se considera que son más económicas que la mayoría de membranas de intercambio de iones (Wei et al., 2011). Este grupo comprende las membranas de microfiltración (MFM) y las membranas de ultrafiltración (UFM). Mediante estas, se “aislan a las soluciones catódica y anódica permitiendo que especies cargadas o neutras las atraviesen si el tamaño de poro es el adecuado, favoreciéndose la transferencia de protones” (Garcia et al., 2012). Poseen algunas limitaciones como el aumento de la permeabilidad al oxígeno y al sustrato, y una alta resistencia interna (Wei et al., 2011).
- Fibras de poro variable: Se trata de materiales del tipo fibra de vidrio, malla de nylon, filtros de celulosa. Destacan porque son muy económicas, sus grandes poros posibilitan un elevado flujo de oxígeno y sustrato que afectaría al rendimiento de la CCM si no se desarrolla una biopelícula sobre su superficie. Esta película también presenta inconvenientes: consume sustrato y reduce la superficie de transferencia de carga. Además, las telas formadas por estas fibras pueden ser biodegradables. Entre ellas, la fibra de vidrio muestra mayores rendimientos ya que es permeable al oxígeno, es resistente al crecimiento de biomasa y no es biodegradable, aumentando considerablemente la eficiencia columbica de la pila. Con esto, los problemas de excesiva permeabilidad de oxígeno y sustrato limitan su uso (Bernal et al., 2012).

1.6 Sustrato

El sustrato es uno de los aspectos más importantes de la CCM porque constituye el combustible a partir del cual se genera la energía. En la literatura científica se encuentran diversos trabajos en los que se emplea una gran variedad de sustratos,

desde compuestos puros hasta mezclas complejas (Liu et al., 2009; Cha et al., 2010).

Tabla 3. Sustratos utilizados por diversas investigaciones.

Sustrato	Autor
Acetato	Huang et al., 2010; Leropoulos et al., 2010; Nam et al., 2010
Glucosa	Li et al., 2010; Sharma & Li, 2010
Sacarosa	Leropoulos et al., 2005
Almidón	Shimoyama et al., 2008
Lactato	Feng et al., 2010
Ácido tereftálico	Song et al., 2009
Tintes sintéticos	Ali, 2010
Indol	Luo et al., 2010
Lactosa, maltosa, xilosa, formiato, propionato, ácido succínico, etanol	Liu et al., 2010

El sustrato constituye el combustible a partir del cual se genera la energía. En los primeros años, sustratos simples como glucosa y acetato eran de uso general, pero en los últimos años las investigaciones se centran en la utilización de sustratos menos convencionales con el fin de utilizar la biomasa presente en aguas residuales de diverso tipo y adicionalmente depurarlas y generar energía (Revelo et al., 2013). Además, se ha demostrado que las CCM pueden utilizar como sustratos no sólo material orgánico degradable, sino también material resistente a la biodegradación (Logan et al., 2006) . El uso de desechos orgánicos domiciliarios posee ciertas ventajas, como el bajo costo de adquisición y la abundancia en la que estos se encuentran (Revelo et al., 2013).

1.7 Solución catolítica

En el compartimento catódico se emplea el oxígeno como aceptor de electrones por su alto nivel de oxidación, disponibilidad y bajo costo. En los últimos años se ha utilizado ferrocianuro de potasio como solución catalizadora por su buen desempeño, sin embargo, puede dañar a la cámara anódica por su difusión a través de la membrana de intercambio protónico a largo plazo (Falcon et al., 2009).

Aleman (2021) realizó la síntesis del catalizador catódico de MnO_2 soportado sobre FC que se realizó mediante reacción redox directa a partir de una solución de permanganato de potasio (KMnO_4) 0.1 M.

1.8 Condiciones operacionales de las CCM

Los aspectos más importantes que inciden en el desempeño de una celda de combustible microbiana es la arquitectura, la función microbiana y el tipo de sustrato (Revelo et al., 2013) Sin embargo, factores como configuración, sustratos y microorganismos no han sido valorados en su conjunto (Revelo et al., 2013), por lo que es importante dedicar esfuerzos investigativos en estos dispositivos con el propósito no solo de optimizar las condiciones de operación sino también de diseñar celdas con materiales de bajo costo empleando sustratos alternativos y microorganismos nativos (Revelo et al., 2015). El rendimiento de las MFC también dependerá de otros factores como la naturaleza del microambiente del ánodo, las resistencias internas y el mecanismo de transferencia de electrones utilizando por la bacteria (Kim & Logan, 2013).

Los parámetros de operación de una CCM, a menudo son factores que incluyen; el inocuo, tipo de combustible y su concentración, la conductividad, el pH, la temperatura y la configuración de la CCM (Du et al., 2007).

1.8.1 Temperatura

La temperatura es un parámetro operativo que se utiliza para controlar el crecimiento y el metabolismo de las poblaciones microbianas en la celda de combustible microbiana (CCM). En general, la producción de metano es más sensible a temperaturas altas, que la generación de energía eléctrica. Un incremento de la temperatura del ánodo de 27 a 38 °C incrementa la producción de metano 3 veces; mientras que la calefacción catódica puede tener probablemente

un impacto positivo en la producción de bioelectricidad (Martin et al., 2010). El rendimiento de las celdas de combustible microbiano en el tratamiento de aguas residuales y generación de bioelectricidad varía de acuerdo a la temperatura en el que se encuentre en el proceso anaeróbico, los consorcios anódicos electroactivos son capaces de eliminar eficazmente el DQO generando energía a temperaturas tan bajas como 4 °C (Larrosa et al., 2010).

1.8.2 pH

Las condiciones de pH son un factor clave en el crecimiento de los microorganismos. La mayoría de las bacterias entéricas no toleran niveles de pH arriba de 7.5 o debajo de 4.0. Además, valores de pH por debajo de 6.8 inhiben la actividad metanogénica (Metcalf & Eddy, 2003). El pH nos indica el tipo de fermentación y actividad microbiana por ende la generación de bioelectricidad, un pH ácido suprime la capacidad de generación de electricidad en una CCM (Goud et al., 2011).

1.8.3 Concentración de materia orgánica

Para lograr un mejor rendimiento de la CCM, el contenido de materia orgánica en el electrolito no debe exceder 6000 mg/L de manera que la celda no alcance un estado saturado que obstaculice los mecanismos de oxidación y por lo tanto la producción de electricidad y la remoción de la materia orgánica (Lopez et al., 2017).

CAPÍTULO II

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Ubicación del experimento

La presente investigación se llevó a cabo en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), en el laboratorio de Química de Suelos ubicado en el Departamento de Ciencias del Suelo.

2.2 Materiales

El grafito fue adquirido en Sigma-Aldrich (Toluca, México), cuenta con diámetros superiores a las 20 micras y una pureza del 99%. Por su parte, las nanofibras de carbono (CNF) fueron suministradas por Pyrograf Products, Inc., estas fueron tratadas térmicamente a 3000 °C para aumentar el grado de grafitización (PR-24-XT-HHT). Además, cuentan con un diámetro promedio de 100 nm, longitudes de 50 a 200 micras, área superficial de 41 m²/g y una pureza mayor al 95%. La mezcla de uretanos y 4-4 disocianato de difenilmetano para la obtención de la espuma de poliuretano fueron adquiridos en Especialidades Químicas para el Poliéster, S.A. de C.V. (Edo. De México, México). El ácido sulfúrico (96 ~ 98%), dicromato de potasio (96 ~ 98%), sulfato de mercurio (> 98%), sulfato de plata (> 98%), y biftalato de potasio (> 99.95%), utilizados durante la determinación de la demanda química de oxígeno (DQO), fueron adquiridos en FERMONT (Monterrey, México). La membrana de intercambio catiónico utilizada en las CCM fue adquirida en Membranes International Inc. (CXM-200, espesor estándar 0.45 ± 0.025 mm).

2.3 Síntesis de los compósitos de PU/Grafito y PU/CNF

Para la fabricación de los polímeros espumados compuestos al 1% de grafito y 1% de CNF, 2.6 g de nanofibras de carbono se dispersaron en 150 mL de polioli mediante agitación mecánica hasta su homogenización. Posteriormente, se añadieron 64 mL de disocianato a cada una de las muestras y se realizó un mezclado durante 60 segundos con un homogeneizador de doble aspa a 4000 rpm.

Se dejó reposar el sistema ya espumado durante 25 minutos. Finalmente, la espuma fue curada en un horno a 100 °C durante 4 h.

2.4 Fabricación y operación de las celdas de combustible microbianas

Se utilizaron celdas de combustible microbianas de doble compartimento, de un volumen aproximado de 2000 mL (1000 mL cada compartimento), agregando una pieza de fieltro de grafito (10 × 10 × 0.8 cm) en el compartimento catódico (cátodo) y 1000 mL de agua desionizada como solución catódica (oxigenando la solución de forma externa con una bomba de aire acoplada a un difusor). En el compartimento anódico se colocó uno de los soportes previamente sintetizados (ánodo) (PU, PU/Grafito 1% y PU/CNF 1%), y 1000 mL de nejayote como sustrato (e inoculo; las características fisicoquímicas del nejayote se muestran en la Tabla 4).

Tabla 4. Características fisicoquímicas del nejayote.

Parámetros	Valores promedios	Unidades
pH	8.2	-
Conductividad eléctrica (CE)	2536	mS/cm
Fosfatos (H₂PO₄)	5	ppm
Cobre (Cu)	0.06	ppm
Nitratos (NO₃)	0	ppm
Nitritos (NO₂)	0	ppm
Hierro (Fe)	0	ppm
Cloro total (Cl_T)	0	ppm
Cloro libre (Cl_L)	0	ppm
Dureza	206.66	ppm
Alcalinidad	66.66	ppm
pH	6.8	-

Se utilizó una membrana de intercambio catiónico pre-hidratada (NaCl 5%, 12 h) para separar los compartimentos. La distancia entre ánodo y cátodo fue de 3 cm. El monitoreo de las celdas se llevó a cabo utilizando un multímetro digital (Fluke 289 - Trendcapture) con el cual se determinó el voltaje (V) de cada celda 1 vez al día (tarde) durante toda la reacción (48 días, utilizando los primeros 33 días como acondicionamiento para asegurar el desarrollo de la biopelícula en la superficie de los ánodos), empleando una resistencia externa de 1 kΩ para cerrar el circuito y un alambre de acero inoxidable como colector de electrones. La densidad de potencia volumétrica (mW/m³) generada en las CCM fue calculada como:

$$P_V = \frac{UI}{V} * 1000$$

donde U es el voltaje (V), I es la corriente eléctrica (A) y V es el volumen del compartimento anódico. Por otra parte, la eficiencia coulombica (%) fue calculada como:

$$E_{cb} = \frac{M \int_0^t I dt}{F b V_{An} \Delta COD}$$

donde $M = 32$ es el peso molecular del oxígeno, I es la corriente eléctrica, $F = 96,485.33$ C/mol es la constante de Faraday, $b = 4$ es el número de electrones intercambiados por mol de oxígeno, V_{An} es el volumen del sustrato en el compartimento anódico, y ΔDQO es la diferencia de DQO a través del tiempo. Finalmente, la demanda química de oxígeno (DQO) fue determinada al inicio y al final de la reacción para evaluar la remoción de materia orgánica en el sistema (NMX-AA-030/2-SCFI-2011).

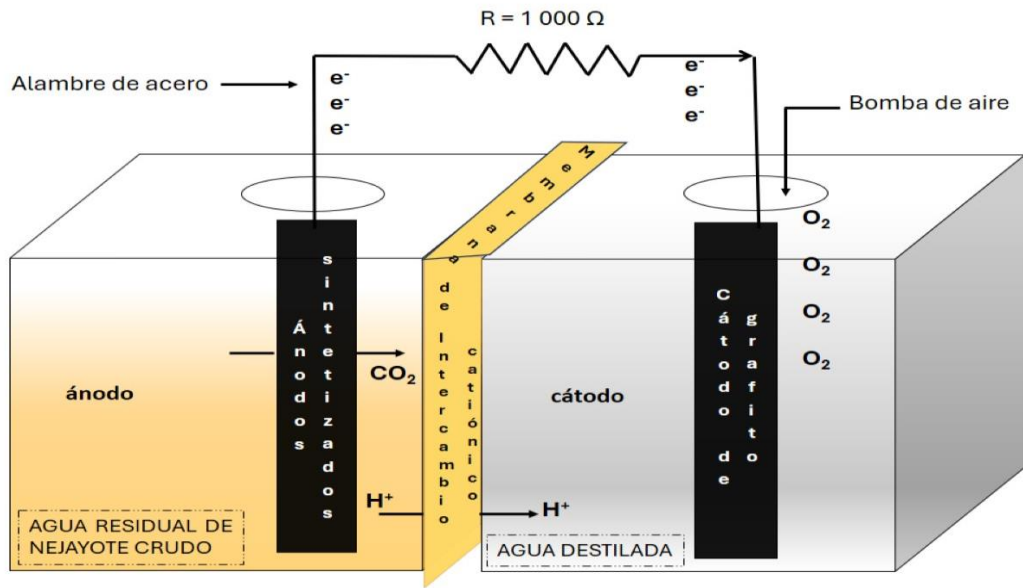


Figura 1. Diagrama de la celda de combustible microbiana (CCM).

Durante la fase experimental se usaron 3 tipos de tratamientos que fueron colocados en el compartimiento anódico. Los cuales se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 5. Tipos de tratamientos usados durante el experimento

Tratamiento	
1	Poliuretano (PU)
2	Poliuretano y Grafito (PU/Grafito) 1%
3	Poliuretano y Nanofibras de Carbono (PU/CNF) 1%

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIONES

A continuación, se presentan los resultados más relevantes obtenidos durante el experimento.

3.1 Voltaje

La figura 2 muestra la generación de voltaje en la CCM durante el tratamiento de nejayote. El comportamiento de los 3 tratamientos se mantuvo muy similar durante todo el experimento. Cabe destacar que el tratamiento que generó mayor voltaje en un inicio fue el T₂ alcanzando valores de 9.8 mV, mientras que el T₃ generó un voltaje máximo de 7.87 mV y el T₁ generó un máximo de 4.05 mV. El incremento de la energía eléctrica producida se debe a la degradación de materia orgánica, que al oxidarse libera electrones al medio, y al ser recuperados en el compartimento anódico y redirigidos al compartimento catódico por un circuito externo son aprovechados.

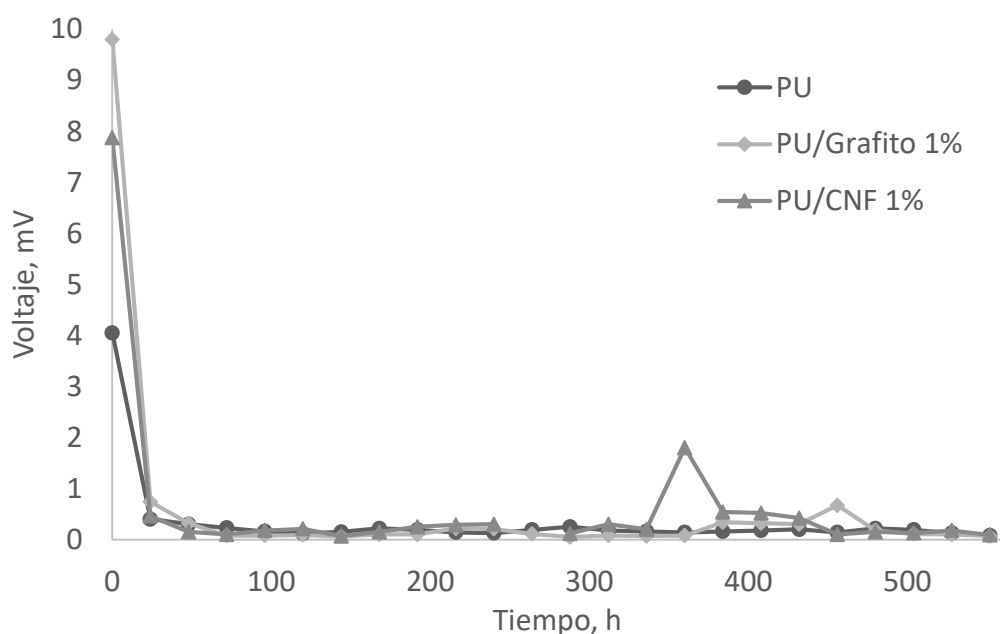


Figura 2. Generación de voltaje en la CCM.

Logan (2008) mencionan que el voltaje generado por una CCM es mucho más complicado de entender y predecir que el de una celda de combustible química. En una CCM, a las bacterias les toma tiempo la colonización del electrodo y la elaboración de las enzimas o estructuras necesarios para transferir electrones, por fuera de la célula.

Rabaey & Verstraete (2005) presentan una detallada revisión sobre la generación de electricidad bacteriana en la cámara anódica y señalan que los principales factores que influyen en la generación de energía son las vías metabólicas que gobiernan el flujo de electrones y protones, la influencia del sustrato y el potencial del ánodo. A altos potenciales anódicos, las bacterias pueden usar la cadena respiratoria en un metabolismo oxidativo y transferir electrones al ánodo, sin embargo, si el potencial del ánodo disminuye los electrones probablemente se depositan sobre aceptores de electrones alternativos (sulfato, nitrato, entre otros) y en su ausencia, ocurrirá la fermentación.

El uso de sustratos complejos con mayor concentración de materia orgánica puede tener efectos mayormente negativos en la generación de voltaje puesto que a una mayor concentración se promueve la acidificación del medio, mediante la fermentación, lo que puede ocasionar caídas de voltaje (Lopez, 2014) y aumenta la resistencia interna del medio (Kong et al., 2018). Adicionalmente, un sustrato típico está mayormente formado por bacterias fermentativas metanogénicas y sulfuroductoras, estas pueden ocupar espacio disponible en el ánodo lo que impediría una generación eficiente de energía y provocar diferentes potenciales (Lopez, 2014).

3.2 Densidad de Potencia

En la figura 3 se observa el comportamiento que tuvo cada uno de los tres tratamientos estudiados, en donde el T₂ generó un máximo de 0.096 mW/m³, el T₃ tuvo 0.061 mW/m³ y por último el T₁ tuvo 0.016 mW/m³. Un aspecto a notar es que en los tres tratamientos la densidad de potencia alcanzó un valor máximo para después decaer linealmente, esto en función de la cantidad de materia orgánica presente en el sustrato.

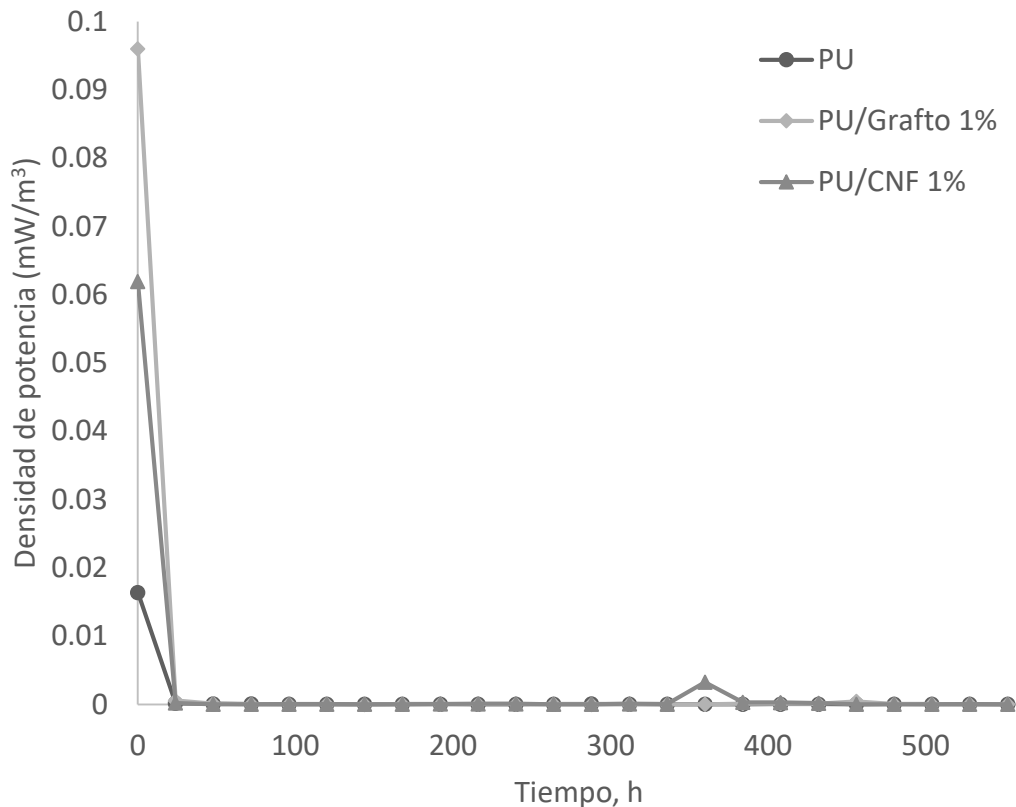


Figura 3. Densidad de Potencia Volumétrica generada en la CCM.

Oh et al., (2004) evaluaron como material anódico el papel carbón en una CCM de dos compartimentos con acetato como sustrato, e inóculo de lodos activados, obteniendo como densidad de potencia 0.097 mW/m^2 ; dicho valor es similar a lo producido en este experimento.

La mayoría de los estudios relacionados con la transferencia de electrones utilizan *Geobacter sulfurreducens*, ya que su genoma se conoce completamente y se sabe que es un gran generador de densidad de potencia. En este experimento, utilizamos nejayote como inóculo, que contiene un consorcio microbiano diverso, lo que es más viable y escalable este tipo de tecnología al comparar con aquellos sistemas que trabajan con cepas puras.

Tabla 6. Análisis comparativo de densidades de potencia obtenidas en estudios similares a lo realizado en este trabajo.

Sustrato	Inóculo	Material del ánodo	Densidades de potencia (mW/m ²)	Referencia
	Bacterias			
Agua residual domestica	presentes en aguas residuales	Grafito	24	Liu et al., 2004
Acetato	Lodos activados	Papel carbón	0.097	Oh et al., 2004
Aguas residuales porcinas	Aguas residuales porcinas	Papel carbón y tela de carbón	408	Min et al., 2005
Glucosa	Cultivo mixto	Grafito	3600	Rabaey et al., 2003
Acetato	Lodos activados	Grafito	788	Park & Zeikus, 2003
Sacarosa	Lodo anaerobio	Acero inoxidable	5.6	Behera & Ghagrekar 2009
Etanol	Lodos activados	Papel carbón	0.097	Kim et al., 2007
Maíz	Agua residual domestica	Papel carbón y tela de carbón	242	Zou et al., 2006

3.3 Eficiencia de Remoción de DQO

En la figura 4 se representa porcentualmente la comparación del desempeño en la remoción de materia orgánica de los diferentes tratamientos estudiados. Se puede observar que el T₂ (PU/Grafito 1%) fue el que obtuvo el mayor valor con un 44.11% de remoción, seguido del T₁ con un valor del 38.72% y por último el T₃ con el 36.98%.

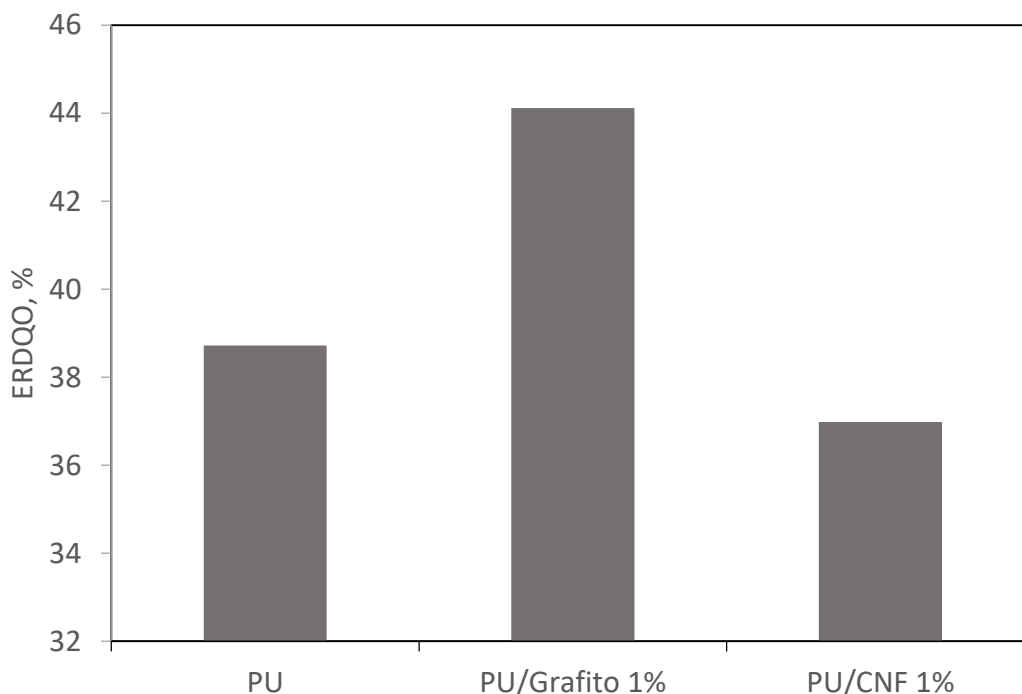


Figura 4. Eficiencia de Remoción de DQO

Los resultados revelaron que el uso del grafito en la cámara anódica, genera una mayor adhesión de microorganismos y, por lo tanto, mayor remoción de materia orgánica en agua de nejayote. Es posible que la actividad microbiana se viera afectada por las bajas temperaturas del área en al que se llevó a cabo el experimento, como es mencionada por (Espinosa et al., 2012).

Tabla 7. Análisis comparativo de reducción de DQO obtenidos en estudios similares a lo realizado en este trabajo.

Tipo de celda	% Remoción de DQO	Sustrato	Tiempo (días)	Autores
Celda de combustible microbiana	88.41	Puentes de sal de agar	25	Sevda & Sreekrishnan, 2012
Celda de combustible microbiana de dos cámaras	0.25	Lodo activado	13	Rodrigo et al., 2007
Celda de combustible microbiana de una sola cámara	80	Agua residual	5	Liu et al., 2004

3.4 Eficiencia coulombica

La eficiencia coulombica (EC) se define como la cantidad de materia orgánica que se recupera como energía eléctrica. Es decir, que, en el primer ciclo, el T₁ que degradó 8.34% de materia orgánica solo el 0.00053% fue aprovechada como energía eléctrica, en el T₂ que degrado el 9.50% de materia orgánica se aprovechó el 0.00070% y finalmente el T₃ que degrado el 7.96% de materia orgánica fue el más eficiente ya que la energía eléctrica aprovechable obtenida fue del 0.00096%. Se demostró que se obtuvieron datos muy bajos, esto nos indica que se tuvo escasas de energía eléctrica generada en el experimento.

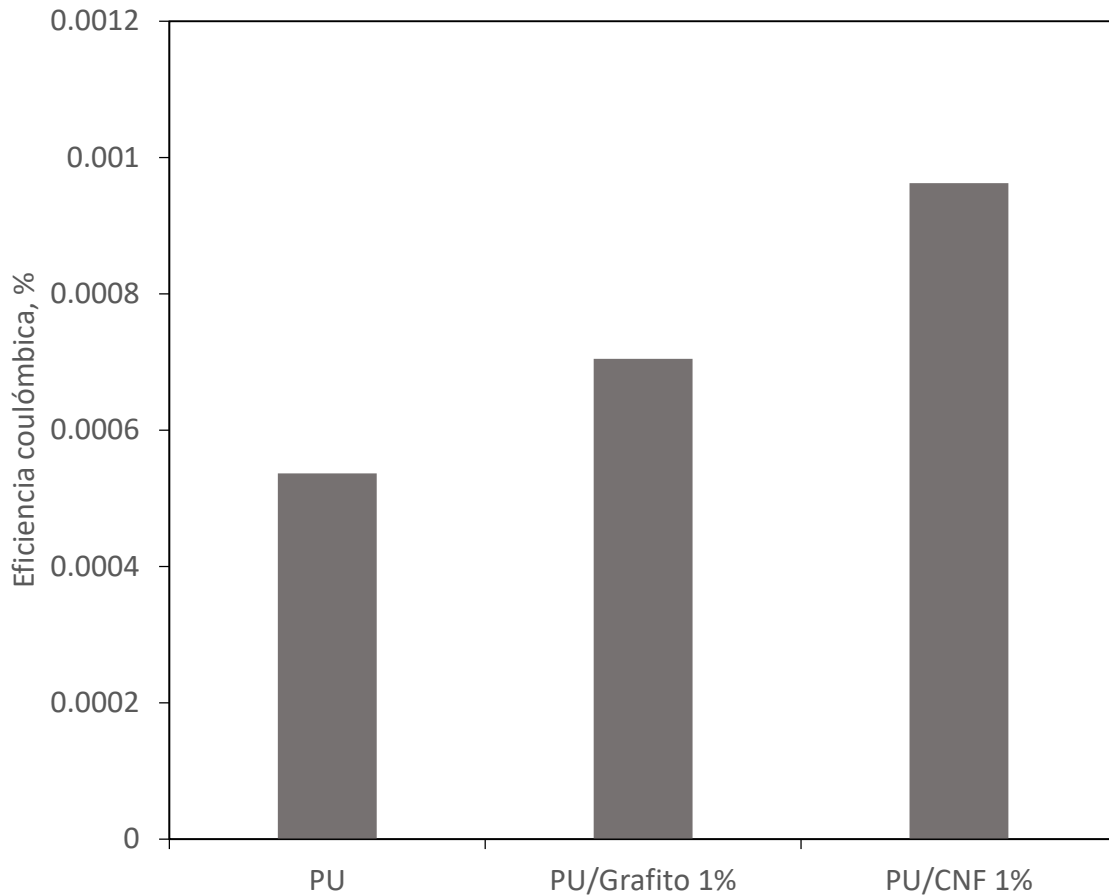


Figura 5. Eficiencia coulombica (%) en el primer ciclo.

Otras investigaciones utilizaron acetato del cual se obtuvo eficiencias de 65% (Min & Logan, 2004) y 63-78% (Oh et al., 2004). Con glucosa, las EC fueron de 89% empleando hexacianoferrato de potasio en su cátodo (Rabaey et al., 2003), estos resultados son superiores a los obtenidos en esta investigación.

Mientras que Liu & Logan (2004) obtuvieron 40-55% empleando una PEM y 9-12% sin el uso de membrana, pero utilizando un cátodo de aire, observándose que la mayor desventaja de este sistema fue la pérdida de sustrato debido a la oxidación aerobia en el ánodo, es decir, en la ausencia de una PEM existe una mayor difusión de O_2 de la cámara del cátodo al ánodo.

Tabla 8. Análisis comparativo EC obtenidos en estudios similares a lo realizado en este trabajo.

Tipo de celda	Sustrato	Cultivo	Tipo de electrodo	EC %	Referencia
Celda de combustible microbiana	Lactato	Shewanella oneidensis	Carbón reticulado vítreo	2.4	Ringeisen et al., 2006
Celda de combustible microbiana de una sola cámara	Agua residual doméstica	Bacterias presentes en aguas residuales	Grafito	3-12	Liu et al., 2004
Celda de combustible microbiana de una sola cámara	Peptona	Bacterias presentes en agua residual doméstica	Papel carbón	6	Heilmann & Logan 2006

Otros factores que reducen la EC son los procesos competitivos y el crecimiento bacteriano. Las bacterias que son incapaces de utilizar el electrodo como aceptor final de electrones, probablemente empleen el sustrato para la fermentación o la metanogénesis (Logan et al., 2006).

Las EC calculadas para CCM que registra la literatura varían, pero en general, incrementan con la densidad de potencia porque hay menos tiempo para que se pierda sustrato durante la competencia en procesos físicos y biológicos (Logan & Regan 2006).

CONCLUSIÓN

Con los resultados obtenidos de este experimento se concluye que el tratamiento T₂ (PU/Grafito 1%) produjo los resultados más altos en cuanto a voltaje (9.8 mV), densidad de potencia (0.096 mW/m³), remoción de materia orgánica (44.11%) y eficiencia coulombica (0.00070%). El recubrir el poliuretano con grafito hace más eficiente al electrodo debido a que este material carbonoso es un excelente conductor eléctrico, lo que permite una eficiente transferencia de electrones en las CCM.

Un aspecto a mejorar en futuros estudios es aumentar el área del ánodo para compensar las pérdidas por muerte y espacio ocupado por otras bacterias no generadoras de electricidad. La mezcla de sustratos podría ser la solución para tener una mayor población de microorganismos que potencialicen la generación de energía eléctrica, de esta manera degradando los contaminantes presentes en el agua de nejayote.

En última instancia, adoptar este tipo de tecnologías representa un paso decisivo hacia un modelo de producción agroindustrial más consciente y responsable, alineado con las metas de sostenibilidad global. La combinación de innovación tecnológica y gestión eficiente de residuos no solo beneficia a la industria del maíz, sino que también promueve la preservación de recursos naturales y la salud de los ecosistemas acuáticos, asegurando un futuro más sostenible para las generaciones futuras.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aleman, E. (2021). Aumento de la potencia de una ccm de sedimentos con un catodo de mno_2/fc , modificando el ph, conductividad y MO. Tesis.
- Ali, H. (2010). Biodegradation of Synthetic Dyes . *A Review, Water Air and Soil Pollution: 213 (1-4)*, 251-273.
- Behera M., Ghangrekar M.M. (2009) Performance of microbial fuel cell in response to change in sludge loading rate at different anodic feed pH. *Bioresource Technology*. 100: 5114-5121.
- Bernal et al., (2012). Tecnologia de membranas en Pilas de combustible microbianas. *Investigacion ETSII*, 66-68. Recuperado el 18 de mayo de 2024.
- Call, D., & Logan, B. E. (2008). Hydrogen production in a single chamber microbial electrolysis cell lacking a membrane. *Environ. Sci. Technol.* 42: 3401-3406.
- Camacho, J. C. (2015). Cosechado de microalgas cultivadas en lagunas de alta carga para el tratamiento de aguas residuales: Efectos del almidon sobre la floculacion y la produccion de biogas. *Master en sostenibilidad de la UPC.* , 29-31.
- Cha, J., S. Choi, H. Yu, H. Kim y C. Kim, (2010) *Directly applicable microbial fuel cells in aeration tank for wastewater treatment*, *Bioelectrochemistry*: 78 (1), 72-79.
- Chaparro, L. K. (2020). Celda De Desalinización Microbiana Con Biocátodo Fotosintético: Generación De Energía, Desalinización Y Reducción De DQO. 1-34.
- Comisión Nacional del Agua. (2007). Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Operacion y mantenimiento de plantas de tratramiento de aguas residuales municipales.

- Du et al., (2007). A state of the art review on microbial fuel cells: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy. *Biotechnology advances*, 25(5), 464-482.
- Espinosa et al., (2012). Efecto de la temperatura en la tasa de crecimiento y decaimiento heterotrófico en el rango de 20-32°C en un proceso de lodos activados. *Revista mexicana de ingeniería química*, 13 (2)., 309-321.
- Falcon et al., (2009). Bioelectricidad biotecnología. 62-78.
- Feng et al., (2010). A dual-chamber microbial fuel cell with conductive film-modified anode and cathode and its application for the neutral electro-Fenton process. *Electrochimica Acta*: 55 (6), 2048-2054.
- Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura, (2016). *Panorama agroalimentario. Ciudad de México: Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura*. Ciudad de México.
- Figueroa, J. (2010). *La ciencia, el desarrollo tecnológico y la innovación en Querétaro. Historia, realidad y proyecciones. Maíz y tortilla: alimento, cultura y tradición de México. Aportaciones queretanas a su modernización*. CINVESTAV, Querétaro.
- Flemming et al., (10 de febrero de 2020). Obtenido de Global Seafood. Alliance.
- Galvarriato, A. G. (2022). La industrialización del nixtamal y la elaboración de la tortilla en México. *Revista del Instituto Riva-Agúero* 7 (1), 231-274.
- García et al., (2012). Tecnología de membrana en Pilas de Combustible microbianas. *V Jornada de introducción*, 68.
- Gernaey et al. (2004). Activated sludge wastewater treatment plant modelling and simulation, State of the art. *Environmental Modelling y Software*, 763-783.
- Gómez G, (2008). Los molinos del Valle de México. Innovaciones tecnológicas y tradicionalismos (Siglos XVI-XIX). Tesis para obtener el grado de Doctor en

Humanidades, Universidad Autónoma Metropolitana, Iztapalapa, División de Ciencias Sociales y Humanidades.

Goud et al. (mayo de 2011). Canteen based composite food waste as potential anodic fuel for bioelectricity generation in single chambered microbial fuel cell (MFC): bioelectrochemical evaluation under increasing substrate loading condition. *International journal of hydrogen energy* 36(10), 6210-6218.

Heilmann J, & Logan B. (2006). Production of electricity from proteins using a single chamber microbial fuel cell. *Water Env. Res.* 78: 531-537

Homem, V., & Santos, L. (2011). Degradation and removal methods of antibiotics form aqueous matrices. *A review Journal of Environmental Management*, 2304.2347.

Hoskins et al. (2014). Spray on polyvinyl alcohol separators and impact on power production in air-cathode microbial fuel cells with different solution conductivities. *Bioresource Technology*, 156-161.

Huang et al., H. (2010). Performance of microbial fuel cells with and without Nafion solution as cathode binding agent. *Bioelectrochemistry*: 34, 261-264.

Ibarra et al., (2008). Effect of processing conditions on instrumental evaluation of nixtamal hardness of corn. *Journal of texture studies* 39, 252-266.

Ieropoulos, I., Greenman, J., Melhuish, C., Hart J. (2005). Comparative study of three types of microbial fuel cell. *Enzyme and Microbial Technology*: 37 (2), 238-245.

Ieropoulos, I., Greenman, J., & Melhuish, C. (2010). Improved energy output levels from small-scale Microbial Fuel Cells. *Bioelectrochemistry (Amsterdam, Netherlands)*, 78 (1), 44-50.

Kim J.R., Jung S.H., Regan J.M., Logan B.E. (2007). Electricity generation and microbial community analysis of alcohol powered microbial fuel cells. *Bioresource Technology*. 98: 2568–2577.

- Kim, Y., & Logan, B. (2013). Microbial desalination cells for energy production and desalination. *Desalination*. 308, 122-130.
- Kong et al., (2018). Performance Investigation of Batch Mode Microbial Fuel Cells Fed With High Concentration of Glucose. *Biomed J Sci & Tech Res* 3(2), 3099-3104.
- Kumar et al., (2018). Polymer electrolyte membranes for microbial fuel cells: Part A. Nafion-Based Membranes". *Progress and recent trends in microbial fuel cells*, 375.
- Larrosa et al., (2010). Effect of temperature on the performance of microbial fuel cells. *Fuel*, 3985-3994.
- Li et al., L. (2010). Electricity generation by two types of microbial fuel cells using nitrobenzene as the anodic or cathodic reactants. *Bioresource Technology: 101 (11)*, 4013-4020.
- Li et al, .. (2011). Recent advances in the separators for micribial fuel cells. *Bioresource technology*, 244-252.
- Li et al. (2017). Carbon-Based Microbial-Fuel-Cell Electrodes: From Conductive supports to active catalysts. *Advanced materials*.
- Liu et al, .. (2010). Bioelectricity generation by a Gram positive Corynebacterium sp.strain MFCO3 under alkaline condition in microbial fuel cells. *Bioresource Technology: 101 (6)*, 1807-1811.
- Liu et al. (2004). Production of electricity during wastewater treatment using a single chamber microbial fuel cell. *Environ. Sci. Technol.* 38 (7) 2281, 1-5.
- Liu, H. S., & Logan, B. E. (2005). Electrochemically assisted microbial production of hydrogen from acetate. *Environ. Sci. Technol.* 39.
- Liu, H. y B. E. Logan, (2004). *Electricity generation using an aircathode single chamber microbial fuel cell in the presence and absence of a proton exchange membrane*, Environmental Science Technology: 38 (14), 4040–4046.

- Liu, J., Pemberton, B., Lewis, J., Scales, P. J., & Martin, G. J. O. (2020). Wastewater treatment using filamentous algae – A review. In *Bioresource Technology* (Vol. 298). Elsevier Ltd.
- Liu, Z., J. Liu, S. Zhang y Z. Su, (2009). *Study of operational performance and electrical response on mediator-less microbial fuel cells fed with carbon- and protein-rich substrates*, *Biochemical Engineering Journal*: 45 (3), 185–191.
- Logan et al, .. (2018). Microbial electrolysis cells for high yield hydrogen gas production from organic matter. *Environ. Sci. Technol.* 42: 8639-8640.
- Logan et al. (2006). Microbial fuel cells: Methodology and technology. *Environmental Science*.
- Logan, (2008). Microbial fuel cells. *John Wiley y Sons*.
- Logan, B. E. y J. M. Regan, (2006). *Electricity-producing bacterial communities in microbial fuel cells*, *Trends in Microbiology*: 14 (12), 512-518.
- Logan, B. E., & Grot, S. A. (2006). A bio-electrochemically assisted microbial reactor that generates hydrogen gas and methods of generating hydrogen gas. *Patent WO2006010149*.
- Lopez et al. (2017). PERFORMANCE OF A MICROBIAL FUEL CELL OPERATED WITH VINASSES USING DIFFERENT COD CONCENTRATIONS. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 33(3), 521-528.
- Lopez, J. D. (2014). Desarrollo de una celda de combustible microbiana (CCM) para aplicación en tratamiento de aguas residuales. *Repositorio Institucional Centro de Investigacion y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica, México*.
- Lorenzo, Y., & Obaya, C. (2005). La digestion anaerobia. Aspectos teoricos. Parte I. ICIDCA. *Sobre los derivados de la caña de azucar*, 35-48.
- Luo et al. (2010). Electricity generation from indole and microbial community analysis in the microbial fuel cell. *Journal of Hazardous Materials*: 176 (1-3), 759-764.

- Martin et al. (2010). The influence of operational conditions on the performance of a microbial fuel cell seeded with mesophilic anaerobic sludge. *Biochemical Engineering Journal*.
- Martinez. (1984). Biological treatability of the wastewaters from the alkaline cooking og maize (indian Corn) *Environmental technology letters* 5(8). 365-372.
- Menéndez, C. (JULIO-SEPTIEMBRE de 2022). La sedimentacion secundaria en los tratamientos biologicos de aguas residuales. Centro de estudios de ingenieria de procesos (CIPRO). Universidad Tecnologica de La Habana Jose Antonio Echeverria. *Ingenieria Hidraulica y Ambiental*. XLIII, 24-33.
- Metcalf, & Eddy. (2003). *Wastewater Engineering Treatment and Reus* (Vol. II). Madrid, España: Mc Graw Hill.
- Min, B, & Logan, B. (2004). Continuous electricity generation from domestic wastewater and organic substrates in a flat plate microbial fuel cell. *Environmental Science and Technology* Vol 38. P. 5814.
- Min et al., (2005). Generacion de electricidad mediante pilas de combustibles microbianas de membrana y puente salino. *Water Res.*
- Min et al., M. (2005). Electricity generation using membrane and salt bridge microbial fuel cells. *Water Research* 9, 39.
- Nam et al. (2010). Effects of organic loading rates on the continuous electricity generation from fermented wastewater using a single-chamber microbial fuel cell. *Bioresource Technology*: 101 (1), 33-37.
- Noyola et al. (2013). *Seleccion de tecnologias para el tratamiento de aguas residuales municipales*. Instituto de Ingenieria. UNAM. Mexico.
- Oh et al. (2004). Cathode performance as a factor in electricity generation in microbial fuel cells. *Env Sci Technol* 38, 348-355.

- Park, D. H y J. G. (2003). Zeikus, *Improved fuel cell and electrode designs for producing electricity from microbial degradation*, *Biotechnology and Bioengineering*: 81 (3), 348–355.
- Pinos , V. (15 de mayo de 2018). *Diario El Tiempo*. Obtenido de [https://www2.ucuenca.edu.ec/260-espanol/investigacion/blog-de-ciencia/ano-2020/enero-2020/1509-oxidacion#:~:text=Los%20Procesos%20de%20Oxidaci%C3%B3n%20Avanzada%20\(POAs\)%20o%20Procesos%20Avanzados%20de,el%20agua%20hasta%20su%20mineralizaci%C3%B3n](https://www2.ucuenca.edu.ec/260-espanol/investigacion/blog-de-ciencia/ano-2020/enero-2020/1509-oxidacion#:~:text=Los%20Procesos%20de%20Oxidaci%C3%B3n%20Avanzada%20(POAs)%20o%20Procesos%20Avanzados%20de,el%20agua%20hasta%20su%20mineralizaci%C3%B3n).
- Rabaey et al., R. (2003). A microbial fuel cell capable of converting glucose to electricity treatment using a single chamber microbial fuel cell. *Env. Sci. Technol* 38: 2281-2285.
- Rabaey, & Verstraete. (2005). Microbial fuel cells novel biotechnology for energy generation. *Trends in Biotechnology* 23 (6), 291-298.
- Rahimnejad et al. (2015). Microbial fuel cell as new technology for bioelectricity generation: A review. *Alexandria Engineering Journal*, 745-756.
- Revelo et al, R. (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*, 26(6), 77-88.
- Revelo et al., R. (2013). Celdas de Combustible Microbianas (CCMs): Un Reto para la Remocion de Materia Organica y la Generacion de Energia Electrica. *Informacion tecnologica*, 24(6), 17-28.
- Ringeisen B.R., Henderson E., Wu P.K., Pietron J., Ray R., Little B., Biffinger J.C., Jones-Meehan J.M. (2006) High power density from a miniature microbial fuel cell using *Shewanella oneidensis* DSP10. *Environmental Science and Technology*. 40: 2629-2634.
- Rodrigo et al. (2007). Production of electricity from the treatment of urban waste water using a microbial fuel cell. *Journal of Power Sources*, 169, 198-204.

- Romero, J. A. (2010). *Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño*. Colombia: Escuela colombiana de ingeniería.
- Rosentrater et al. (1999). Physical and nutritional properties of corn masa byproduct streams. *Applied engineering in agriculture* 15 (5). 515-523.
- Rozendal et al., R. (2008). Towards practical implementation of bioelectrochemical wastewater treatment. *Trends Biotechnol.* 26: 450-459.
- Ruiz, M. F. (23 de junio de 2022). *Once noticias digital*. Obtenido de El nixtamal, base e importancia en la gastronomía mexicana. La nixtamalización es una técnica tradicional que se usa desde la época prehispánica
- Salwan. (2009). Review of the membrane and bipolar plates materials for conventional and unitized regenerative fuel cell. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1663-1668.
- Sela, G. (14 de julio de 2020). *Procesos de tratamiento de aguas*. Obtenido de tratamiento de aguas.
- Sánchez R, (1980). Historia de la tecnología y la invención en México. Introducción a su estudio y documentos para los anales de la técnica. Fomento Cultural Banamex.
- Sevda, S., & Sreekrishnan. (2012). Effect of salt concentration and mediators in salt bridge microbial fuel cell for electricity generation from synthetic wastewater. *Journal of environmental science and health. Part A, Toxic/hazardous substances & environmental engineering*, 47(6), 878-886.
- Sharma, Y., & Li, B. (2010). Optimizing energy harvest in wastewater treatment by combining anaerobic hydrogen producing biofermentor (HPB) and microbial fuel cell (MFC). *International Journal of Hydrogen Energy*: 35 (8), 3789-3797.
- Shimoyama et al. (2008). Electricity generation from model organic wastewater in a cassette-electrode microbial fuel cell. *Applied Microbiological Biotechnology*: 80 (2), 325-330.

- Song et al. (2009). Electricity generation from terephthalic acid using a microbial fuel cell. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology: 84 (3)*, 356-360.
- Valderrama et al, .. (2013). Constant pressure filtration of lime water (nejayote) used to cook kernels in maize processing. . *Journal of food engineering 110*, 478-486.
- Velazco et al. (1997). Effect of dried solids of nejayote of broiler growth. *Poultry Science*. 1531 -1534.
- Venegas, M. (15.18 de Noviembre de 2016). PRODUCCIÓN Y COMERCIALIZACIÓN DEL MAÍZ EN MÉXICO, COBERTURA DE RIESGO CON DERIVADOS. *21° Encuentro Nacional sobre Desarrollo Regional en México. AMECIDER – ITM.*, 1-5.
- Wang et al. (2005). Treatment of cosmetic industry wastewater by flotation with *Moringa oleifera* Lam. and aluminum sulfate and toxicity assessment of the treated wastewater. *5 Chemical Precipitation. Physicochemical treatment processes 3*. 141-197.
- Wei et al. (2011). Recent progress in electrodes for microbial fuel cells. *Bioresour Technol* , 9335-9344.
- Wojciech, B., & Ewa, A. (2018). Removal of veterinary antibiotics from wastewater by electrocoagulation chemosphere 194. 381-389.
- Zhou et al. (2011). An overview of electrode materials in microbial fuel cells. *Journal of power sources*, 11.
- Zhuang et al. (2012). Scalable microbial fuel cell (MFC) stack for continuous real wastewater treatment. *Bioresour Technol*, 106, 82-88.
- Zou et al. (2008). Ion exchange membrane cathodes for scalable microbial fuel cell. *Environmental science y technology*, 5.
- Zou, Y.; Maness, P.; Logan, B. (2006) Electricity production from steam-exploded corn at over biomass. *Energy Fuel*. Vol. 20. P. 1716-1721.