

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



Electrodos de fieltro de grafito en celdas de combustible microbianas para el
tratamiento de nejayote y generación de energía eléctrica

Por:

EMMANUEL CRUZ HERNANDEZ

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL

Saltillo, Coahuila, México

Enero de 2025

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

Electrodos de fieltro de grafito en celdas de combustible microbianas para el
tratamiento de nejayote y generación de energía eléctrica

Por:

EMMANUEL CRUZ HERNANDEZ

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. Elan Iñaky Laredo Alcalá

Asesor Principal Externo


Dra. Silvia Yudith Martínez Amador

Coasesor


M.C. Laura María González Méndez

Coasesor

Saltillo, Coahuila, México.

Enero de 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO

Electrodos de fieltro de grafito en celdas de combustible microbianas para el
tratamiento de nejayote y generación de energía eléctrica

Por:

EMMANUEL CRUZ HERNANDEZ

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. Laura María González Méndez
Coasesor


Dr. Elan Iñaky Laredo Alcalá
Vocal suplente

M.C. Sergio Sánchez Martínez

Coordinador de la División de Ingeniería

Buenvista, Saltillo Coahuila, México.

Enero 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:

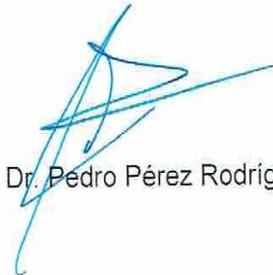
Reproducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (cortar y pegar); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (auto plagio); comprar, robar o pedir prestados los datos o la tesis para presentarla como propia; omitir referencias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



Emmanuel Cruz Hernandez

Asesor principal



Dr. Pedro Pérez Rodríguez

DEDICATORIA

A Dios, por haberme dado la vida, la salud y por guiarme en todo momento. Gracias por nunca dejarme solo, sobre todo en los días más difíciles. Sé que todo por lo que he pasado, ya sea bueno o malo, tiene un propósito, y confío plenamente en que todo lo que viene es para algo bueno. Gracias por mi familia, por mis amigos y seres queridos, y por darme la oportunidad de concluir otro capítulo de mi vida, el cual nunca pensé que llegaría tan pronto o veía como un sueño muy lejano. Ahora sé que con dedicación y esfuerzo, los sueños se cumplen. Gracias Dios.

A mi papá, Miguel Honorio Cruz Santos, por todo el apoyo incondicional que me has brindado siempre. Gracias por todo tu esfuerzo, por tus consejos, por tu amor y por siempre confiar en mí. No cabe duda de que sin ti, este sueño no se hubiera realizado o hubiera sido mucho más difícil. Y, sobre todo, gracias por darme la mejor herencia: una carrera universitaria. Te amo Papá.

A mi mamá, Anali Hernandez Santiago, gracias por todo tu cariño, apoyo y amor que me has brindado, por escucharme y darme tus consejos. Sé que hemos pasado malos momentos y hemos tenido desacuerdos, pero siempre hemos podido resolver cada situación. Gracias por todo, te amo, mamá.

A mis hermanos, Edwin y Kevin, les quiero agradecer por siempre estar ahí cuando los he necesitado en todos los aspectos. Gracias por todo lo que hemos pasado. Gracias, Win, por ser un ejemplo a seguir, por llamarme la atención en su momento, y gracias a ti, he logrado cosas increíbles. Los amo, hermanos.

A mis amigos, Alejandra Plata que siempre me has apoyado desde que nos conocimos. Gracias por brindarme tu apoyo incondicional en las buenas y malas. Al igual que Jaime Hernandez, Zury, Maxi, Iván, Regina, Monserrath y Sherlyn Vargas, gracias por todos los buenos momentos que pasamos. Son los mejores amigos que pude tener en la universidad y les agradezco el estar ahí para apoyarme. A todos mis amigos y personas que han contribuido en mi formación personal y profesional.

Muchas gracias a todos.

AGRADECIMIENTOS

A mi *Alma Terra Mater* por ser mi segundo hogar, por recibirme con las puertas abiertas, darme la oportunidad de formar parte de esta casa de estudios y formarme de manera profesional, por tu comedor, tu transporte. Gracias por que aquí fue donde conocí compañeros, amigos, maestros y excelentes personas que hicieron de mi estancia en la universidad un lugar mejor, sin duda siempre te llevaré en el corazón mi Narro.

Al Departamento de Ciencias del Suelo, a cada persona que labora en el departamento, que sin su trabajo el departamento no sería el que es hoy en día.

A mis maestros que me ayudaron a formarme de manera profesional, gracias por compartir sus conocimientos, por su paciencia y dedicación como profesores.

Al comité de asesoría Dr. Elan Iñaky Laredo Alcalá, Dra. Silvia Yudith Martínez Amador, M.C Laura María González Méndez por su amable apoyo, tiempo, participación, revisión y análisis del presente trabajo.

A mi asesor principal, Dr. Pedro Pérez Rodríguez por su disponibilidad para realizar el presente trabajo, gracias por su amistad, por todo su apoyo brindado, por su confianza, por todos sus conocimientos compartidos en clase como en el desarrollo de este trabajo. Gracias por sus consejos y motivación que me brindo en el transcurso de la carrera y sobre todo apoyarme a culminar el último paso de mi carrera y así poder titularme.

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 - REVISIÓN DE LITERATURA	16
1.1 El maíz	16
1.2 Composición química del maíz	16
1.3 Importancia global del cultivo del maíz	17
1.4 Importancia nacional del cultivo del maíz.....	18
1.5 Importancia cultural del maíz en México	18
1.6 Nixtamalización	19
1.7 Nejayote.....	19
1.8 Métodos convencionales de tratamiento del Nejayote	20
1.9 Métodos emergentes para el tratamiento del Nejayote	22
1.9.1 Biorreactores de membrana.....	22
1.9.2 Electrocoagulación y electrooxidación	22
1.9.3 Oxidación avanzada.....	23
1.9.4 Oxidación fotocatalítica	23
1.10 Sistemas bioelectroquímicos (SBE).....	23

1.11 Tipos de sistemas bioelectroquímicos	24
1.11.1 Celdas de combustible microbianas (CCM)	24
1.11.2 Celdas de electrólisis microbiana (CEM).....	25
1.11.3 Celdas de desalinización microbiana (CDM).....	25
1.12 Componentes de los sistemas bioelectroquímicos	25
1.12.1 Electroodos	26
1.12.2 Membrana de intercambio catiónico (CEM):	26
1.13 Fundamentos de los sistemas bioelectroquímicos	26
1.14 Parámetros que afectan el desempeño de los sistemas bioelectroquímicos	27
CAPITULO II - MATERIALES Y MÉTODOS	29
2.1 Ubicación del experimento	29
2.2 Materiales	29
2.3 Fabricación y operación de las celdas de combustible microbianas	29
CAPITULO III - RESULTADOS Y DISCUSIONES	32
3.1 Voltaje	32
3.2 Densidad de potencia	33
3.3 Eficiencia de remoción de DQO	35
3.4 Eficiencia coulombica.....	37
CONCLUSIÓN	40
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Generación de voltaje en la CCM	32
Figura 2. Densidad de potencia volumétrica generada en la CCM	33

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición química proximal de las partes principales de los granos de maíz	16
Tabla 2. Composición química de los cereales	17
Tabla 3. Parámetros contaminantes en el nejayote y sus valores máximos establecidos por normatividad	20
Tabla 4. Características fisicoquímicas del nejayote	30
Tabla 5. Resultados de densidades de potencia reportadas en otras investigaciones	34
Tabla 6. Eficiencia de Remoción de DQO en la CCM	36
Tabla 7. Resultados de DQO obtenidos en otras investigaciones.....	36
Tabla 8. Resultados de EC obtenidos en otras investigaciones.....	38

ABREVIATURAS

°C	Grados centígrados
AEM	Membrana de intercambio aniónico (por sus siglas en ingles)
AT	Alcalinidad total
BES	Sistemas bioelectroquímicos
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
Cu	Cobre
DBO ₅	Demanda bioquímica de oxígeno
DQO	Demanda química de oxígeno
EC	Eficiencia coulombica
Fe	Hierro
g	Gramos
m ³	Metro cubico
mg/L	Miligramos por litro
MIC	Membrana de intercambio cationico
MIP	membrana de intercambio de protones
mL	Mililitros
mW/m ³	Densidad de potencia
NMX	Norma mexicana
NOM	Norma oficial mexicana
pH	Potencia de hidrogeno
ppm	Partes por millón
ST	Sólidos totales

RESUMEN

La ausencia de normativas y tecnologías disponibles para gestionar el residuo de nejayote incrementa su efecto negativo en el medio ambiente, particularmente en áreas donde el maíz es un alimento fundamental. 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 catódica (oxigenando la solución de forma externa con una bomba de aire acoplada a un difusor). En el compartimiento anódico se colocó otra pieza de fieltro de grafito y 1000 mL de nejayote como sustrato. En este experimento observamos una remoción de DQO y una densidad de potencia volumétrica máxima de 51.38 % y 7.78 mW/m³, respectivamente. Los resultados demostraron que el uso de ánodos de fieltro grafito en celdas de combustible microbianas promueve la remoción de materia orgánica y la generación de energía eléctrica durante el tratamiento de nejayote.

INTRODUCCIÓN

A medida que la población mundial crece, la demanda de maíz también lo hace. El maíz es fundamental no solo para la alimentación humana, sino también para la alimentación animal y la producción de biocombustibles. Sin embargo la producción intensiva de maíz genera una gran cantidad de residuos los cuales impactan de manera negativa al medio ambiente generando así los siguientes problemas: degradación del suelo, contaminación del agua, emisiones de gases de efecto invernadero, pérdida de biodiversidad, el nejayote, entre otros.

El nejayote es un subproducto líquido generado durante el proceso de la nixtamalización del maíz. Este residuo representa un desafío ambiental significativo debido a su alto contenido en sólidos, alcalinidad y compuestos orgánicos. Si no se trata adecuadamente, este puede contaminar cuerpos de agua, afectar la vida acuática y deteriorar los suelos agrícolas.

Las celdas de combustible microbianas (CCM) son una tecnología emergente que puede ayudar a contribuir en el tratamiento adecuado de este residuo. Las CCM son dispositivos que pueden funcionar de forma continua, generando electricidad mientras reciben un suministro constante de combustible y oxidante. Mediante reacciones de óxido-reducción en presencia de un catalizador, convierten la energía química en energía eléctrica, sin recurrir a la combustión y sin producir contaminación en el aire ni en el agua.

En la actualidad las CCM incorpora tecnologías avanzadas de manera que, se perfila como una alternativa para generar energía limpia y renovable, también destaca como una opción segura y sostenible para descontaminar las aguas residuales del nejayote ya que permite la depuración de desechos industriales y al mismo tiempo, la generación de energía, impulsando así una economía circular más eficiente y respetuosa con el medio ambiente.

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la generación de voltaje y la degradación de materia orgánica en muestras de nejayote utilizando celdas de combustible microbianas empacadas con electrodos de fieltro de grafito.

Objetivos Específicos

1. Construir y acondicionar el sistema bioelectroquímico.
2. Evaluar la generación de voltaje en las celdas de combustible microbianas.
3. Cuantificar la remoción de materia orgánica en los sistemas bioelectroquímicos.
4. Evaluar la calidad fisicoquímica del agua tratada.

HIPÓTESIS

El uso de electrodos de fieltro de grafito incrementará la remoción de materia orgánica y la generación de energía eléctrica en celdas de combustible microbianas alimentadas con nejayote.

CAPÍTULO I

REVISIÓN DE LITERATURA

1.1 El maíz

El maíz, es uno de los cereales más importantes del mundo, es el segundo cultivo del mundo por su producción, después del trigo, mientras que el arroz ocupa el tercer lugar. Es el primer cereal en rendimiento de grano por hectárea y es el segundo, después del trigo, en producción total. El maíz es de gran importancia económica a nivel mundial ya sea como alimento humano, como alimento para el ganado o como fuente de un gran número de productos industriales (Paliwal, 2001).

El maíz cultivado es una planta completamente domesticada y el hombre y el maíz han vivido y han evolucionado juntos desde tiempos remotos. El maíz no crece en forma salvaje y no puede sobrevivir en la naturaleza, siendo completamente dependiente de los cuidados del hombre (Paliwal, 2001).

1.2 Composición química del maíz

Las partes principales del grano de maíz difieren considerablemente en su composición química. El pericarpio se caracteriza por un elevado contenido de fibra cruda, aproximadamente el 87%, la que a su vez está formada fundamentalmente por hemicelulosa, celulosa y lignina. El endospermo, en cambio, contiene un nivel elevado de almidón (87%), aproximadamente 8% de proteínas y un contenido de grasas crudas relativamente bajo (Burge & Duesing, 1989).

Tabla 1. Composición química proximal de las partes principales de los granos de maíz (Watson, 1987).

Componente químico	Pericarpio (%)	Endospermo (%)	Germen (%)
---------------------------	---------------------------	---------------------------	-----------------------

Proteínas	3.7	8.0	18.4
Extracto etéreo	1.0	0.8	33.2
Fibra cruda	86.7	2.7	8.8
Cenizas	0.8	0.3	10.5
Almidón	7.3	87.6	8.3
Azúcar	0.34	0.62	10.8

En la tabla 2 se muestra la composición química de diferentes cereales, que en general es bastante homogénea, siendo el componente más abundante de estos, el almidón. El contenido de proteínas es en general del 9 a 12%. Los lípidos se encuentran aproximadamente en 5% y el contenido de fibra cruda es muy similar entre ellos, siendo el maíz con mayor contenido de ésta al tener 2.2% (Astiasarán et al., 1999).

Tabla 2. Composición química de los cereales (Astiasarán et al., 1999).

% Peso	Trigo	Centeno	Maíz	Cebada	Avena	Arroz	Mijo
Agua	13.2	13.7	12.5	11.7	13.0	13.1	12.1
Proteína	11.7	11.6	9.2	10.6	12.6	7.4	10.6
Lípidos	2.2	1.7	3.8	2.1	5.7	2.4	4.1
Almidón	59.2	52.4	62.6	52.2	40.1	70.4	64.4
Otros HCO*	10.1	16.6	8.4	19.6	22.8	5.0	6.3
Fibra cruda	2.0	2.1	2.2	1.6	1.6	0.7	1.1
Minerales	1.5	1.9	1.3	2.3	2.9	1.2	1.6

*HCO: Carbohidratos

1.3 Importancia global del cultivo de maíz.

Con una producción de aproximadamente 348,8 millones de toneladas en 2022, Estados Unidos se mantuvo como el principal país productor de maíz del mundo. China y Brasil se situaron en segunda y tercera posición, respectivamente, ambos

con cosechas superiores a los 100 millones. De hecho, entre las tres naciones englobaron casi dos terceras partes del volumen total producido de este cereal a nivel global durante el año referido (Orús, 2024).

1.4 Importancia nacional del cultivo del maíz

El maíz es originario de México, y por la evidencia hallada en Tehuacán, Puebla, se sabe que su cultivo inició hace siete mil años; su domesticación permitió que los grupos nómadas se volvieran sedentarios convirtiéndose así en el sustento de los pueblos mesoamericanos. Es de gran importancia ya que es el cultivo que genera más valor en el país (SADER, 2023).

La Producción de maíz en 2017 fue de 27.8 millones de toneladas, mientras que la superficie sembrada en el mismo año fue de 7.5 millones de hectáreas, gran parte del territorio nacional es propicio para la producción por lo que en los 32 Estados de la República Mexicana se produce maíz grano (ASERCA, 2018).

La producción se divide en maíz blanco y maíz amarillo, el primero representa el 87% del total nacional, cubriendo completamente la demanda del consumo humano que requiere el país, por otra parte, el grano amarillo, que se destina a la industria y fabricación de alimentos balanceados para producción pecuaria, satisface sólo el 24% de los requerimientos nacionales (SADER, 2018).

1.5 Importancia cultural del maíz en México

En México, el maíz es parte importante de la dieta de los mexicanos, ya que es un cultivo que su población lo ha consumido desde tiempos ancestrales y que fue un factor importante en el asentamiento y desarrollo de las primeras culturas mesoamericanas, como los aztecas, olmecas, mayas etc. En náhuatl se conocía como Tlayoli, Centli o Cintle, en maya como Ixi y Detha en Otomí (Reyes C. P., 1990).

En las civilizaciones maya y azteca tuvo un importante papel en sus creencias religiosas, festividades y nutrición. Estas civilizaciones afirmaban que la carne y la sangre estaban formadas por maíz (León & Rosell, 2007).

El maíz no solo significaba una mercancía o parte de la alimentación básica junto con el frijol y el chile, era un elemento crucial en su cultura y en su identidad, ya que el desarrollo de las civilizaciones nahuas, mayas, zapotecas, olmecas, entre otras, se cimentó en su cultivo y su aprovechamiento. Formó parte vital del calendario agrícola y de varias de sus festividades relacionadas con la fertilidad y la creatividad (Barros, 2008).

Este grano no sólo ha sido un alimento básico, sino también un símbolo sagrado, representando la vida y la fertilidad en diversas mitologías de pueblos originarios. La relación entre el maíz y la cultura mexicana se refleja en la gastronomía, las artes y las tradiciones populares, como el Día de Muertos, donde el maíz es utilizado como ofrenda (CIAD, 2023).

A la fecha el maíz forma parte de nuestra alimentación diaria al consumir tortilla, esquites, atole, chilaquiles, huitlacoche, pozole, entre otros. Además, continúa siendo uno de los elementos más representativos de la identidad de los mexicanos (Barros, 2008).

1.6 Nixtamalización

Del náhuatl nixtli, cenizas, y tamalli, masa, el proceso de la nixtamalización se ha transmitido de generación en generación en Mesoamérica, y todavía se utiliza como en tiempos prehispánicos. Se inicia con la adición de dos partes de una solución de cal aproximadamente al 1% a una porción de maíz. Esta preparación se cuece de 50 a 90 minutos, y se deja remojando en el agua de cocción de 14 a 18 horas (Paredes et al, 2010). Posterior al remojo, el agua de cocción, conocida como nejayote, se retira y el maíz se lava dos o tres veces con agua, sin retirar el pericarpio ni el germen del maíz. Se obtiene así el llamado maíz nixtamalizado o nixtamal, que llega a tener hasta 45% de humedad (Paredes et al, 2010).

1.7 Nejayote

El nejayote, agua residual de la nixtamalización del maíz, se considera como altamente contaminante debido a su alta demanda biológica de oxígeno (2692-7875

mg O₂/L), alta demanda química de oxígeno (10,200-22,000 mg O₂/L) y pH básico (10.5 - 11.2). Algunos autores reportan que la pérdida de sólidos en el nejayote, depende de las operaciones comerciales de tortilla, encontrándose una variación que va de 8.5 hasta 12.5% (Rosentrater, 2006).

1.8 Métodos convencionales de tratamiento del Nejayote

Actualmente el deterioro de la calidad de las aguas superficiales va en aumento gracias a los vertidos de aguas residuales domésticas, industriales y agrícolas no tratadas, los cuales no solo afectan a los ecosistemas naturales y su biodiversidad, sino que también amenazan la salud de la población que depende directamente de ellos (Jiménez, 2023).

Las Normas Oficiales Mexicanas, NOM-001-ECOL-1996 y NOM-002-ECOL-1996, establecen los límites máximos permisibles de contaminantes de las descargas de aguas residuales provenientes de la industria (Tabla 3). Los compuestos orgánicos e inorgánicos y sus concentraciones en el nejayote son más altos con respecto a los límites permisibles de las Normas Oficiales Mexicanas y, por tanto, no puede ser arrojado al drenaje o alcantarillado sin previo tratamiento (Pérez, 2012).

Tabla 3. Parámetros contaminantes en el nejayote y sus valores máximos establecidos por normatividad.

Parámetros	Valores máximos por normatividad	Valores en nejayote**
pH	5-10*	10.5-11.6
Sólidos suspendidos (mg/L)	60*	5000 - 35000
Demanda bioquímica de oxígeno (mg O ₂ /mL)	60*	190 - 7875

Datos tomados de las *NOM-001-ECOL-1996, *NOM-002-ECOL-1996 y **Rosentrater et al., (2006).

El tratamiento del nejayote, el subproducto líquido de la nixtamalización del maíz, puede abordarse utilizando varios métodos convencionales. Estos métodos incluyen tanto tratamientos físicos como químicos y biológicos. A continuación, se describen los métodos más comunes:

- **Sedimentación:** Proceso físico en el que se permite que los sólidos en suspensión se asienten en el fondo de un tanque debido a la gravedad. Se centra en la reducción de contaminantes presentes en este subproducto de la nixtamalización (Mendoza & Gutiérrez, 2004).
- **Coagulación y Floculación:** Son procesos esenciales en el tratamiento de aguas residuales, como el nejayote. La coagulación implica la adición de coagulantes (como sales metálicas, por ejemplo, sulfato de aluminio o cloruro férrico) que neutralizan las cargas eléctricas de las partículas suspendidas, permitiendo que se aglutinen en partículas más grandes llamadas flóculos. Posteriormente, la floculación facilita que estos flóculos se unan formando masas más grandes que pueden ser removidas mediante sedimentación o filtración (González et al., 2010).
- **Lodos activados:** Es un tratamiento biológico que emplea microorganismos para degradar la materia orgánica presente en el nejayote consiste en la aireación del agua residual para fomentar el crecimiento de microorganismos que metabolizan los contaminantes (Rojas & Utrilla, 2008).
- **Lagunas de estabilización:** Son otra técnica biológica que utiliza grandes estanques para el tratamiento de aguas residuales. En estas lagunas, los contaminantes son degradados por procesos biológicos naturales, principalmente mediante la acción de algas y bacterias. Este método es menos intensivo en energía y mantenimiento comparado con los lodos activados, pero requiere más espacio y tiempo para el tratamiento completo (Rojas & Utrilla, 2008).
- **Filtración:** Técnica que permite separar los sólidos suspendidos en el nejayote, reduciendo su carga contaminante. Este proceso puede llevarse a cabo utilizando diferentes materiales filtrantes y condiciones de operación. Consiste en pasar el nejayote a través de medios filtrantes para remover

sólidos en suspensión y algunas impurezas disueltas (Salazar & Ascencio, 2011).

- **Oxidación Química:** Se enfoca en la utilización de procesos químicos para tratar los desechos líquidos de la nixtamalización del maíz. La oxidación química implica el uso de agentes oxidantes para romper compuestos orgánicos complejos y reducir la demanda química de oxígeno (DQO), convirtiéndolos en sustancias menos nocivas o más fáciles de manejar. Este método es una alternativa a los tratamientos biológicos y puede ofrecer soluciones eficientes para la gestión de residuos en la industria del maíz nixtamalizado (Reyes & Paredes, 1993).

1.9 Métodos emergentes para el tratamiento del Nejayote

1.9.1 Biorreactores de membrana

Los biorreactores de membranas (BRM) son sistemas muy compactos y eficientes en la separación de materia en suspensión y coloidal, que permiten obtener aguas regeneradas de elevada calidad físico-química y microbiológica. Esto ha favorecido su rápida implantación sustituyendo el esquema clásico de las depuradoras tradicionales de lodos activos y que hoy en día estén ampliamente distribuidos por todo el mundo (Judd, 2010).

1.9.2 Electrocoagulación y electrooxidación

La electrocoagulación (EC) y la electrooxidación (EO) se basan en el principio de introducir una corriente eléctrica para inducir reacciones químicas en el sistema, lo que provoca la desestabilización de la mayoría de los contaminantes (por ejemplo, partículas suspendidas, bacterias, virus, materiales disueltos, metales, hidrocarburos y muchos compuestos orgánicos). El consumo de energía relativamente bajo, la ausencia de utilización de productos químicos con la posible recuperación y reutilización del agua tratada, así como la flexibilidad total de tamaño para su uso tanto en áreas urbanas como rurales, hacen que la EC y la EO sean

tecnologías verdaderamente ecológicas para el tratamiento de agua y aguas residuales. (Drogui et al., 2022).

1.9.3 Oxidación avanzada

Actualmente se han desarrollado procesos de oxidación más eficientes llamados Procesos Avanzados de Oxidación (AOP) los cuales son aplicados generalmente en pequeña o mediana escala y especialmente en donde los métodos convencionales pierden eficiencia. Este es el caso de aguas con concentración de contaminantes tóxicos no biodegradables muy altas (> 1 g/l), o muy bajas (< 5 mg/l) (Forero et al., 2005). Las AOP se basan en procesos fisicoquímicos capaces de producir cambios profundos en la estructura química de los contaminantes debido a que involucran la generación y uso de especies transitorias con un elevado poder oxidante como el radical hidroxilo ($\text{HO}\cdot$). Este radical puede ser generado por varios medios y es altamente efectivo para la oxidación de materia orgánica, en especial aquella que no es biodegradable (Legrini et al., 1993).

1.9.4 Oxidación fotocatalítica

La oxidación fotocatalítica consiste en la destrucción de los contaminantes mediante el empleo de radiación solar ultravioleta y catalizadores con el objeto de formar radicales hidroxilo, los cuales posteriormente tendrán un efecto oxidante sobre los contaminantes químicos. En este proceso la oxidación tiene lugar directamente en la superficie de la partícula que se utiliza como catalizador o semiconductor (TiO_2 , entre otros), siendo la radiación solar la única fuente de energía (Garces et al., 2004).

1.10 Sistemas bioelectroquímicos (SBE)

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, como las de óxido-reducción (Rabaey, 2007). Los sistemas

bioelectroquímicos son una herramienta biotecnológica útil para explorar y explotar la capacidad de los microorganismos de mejorar el rendimiento de su fermentación. Estos sistemas utilizan la energía eléctrica como una fuerza externa para redirigir las vías metabólicas microbianas hacia el aumento o disminución de los productos finales. (Aguilar et al., 2016).

1.11 Tipos de sistemas bioelectroquímicos

Según su modo de operación y de su aplicación se clasifican en tres grandes categorías: celdas de combustible microbianas (CCM) para la generación de energía eléctrica, celdas de electrólisis microbiana (CEM) que producen principalmente compuestos químicos inorgánicos como el hidrógeno y celdas de desalinización microbiana (CDM) utilizadas para la desalinización del agua en combinación con otras funciones (Wang & Ren, 2013).

1.11.1 Celdas de combustible microbianas (CCM)

Son dispositivos en los cuales una o varias especies microbianas convierten la energía química contenida en la materia orgánica en energía eléctrica. Estos microorganismos se alimentan de desechos orgánicos biodegradables y producen electrones que son transferidos a un electrodo para generar electricidad. Cabe añadir que las reacciones involucradas en este sistema se dan de forma espontánea. En las CCM los electrodos son los que permiten llevar a cabo la generación de energía eléctrica, en el ánodo las bacterias llevan a cabo la oxidación del sustrato y en el cátodo es donde llegan los electrones que se transportaron por un circuito externo, liberando los electrones gracias a la acción de rutas metabólicas (Bermudez & Bernal, 2018).

1.11.2 Celdas de electrólisis microbiana (CEM)

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 (Rozendal et al., 2006).

1.11.3 Celdas de desalinización microbiana (CDM)

Las celdas de desalinización microbiana (CDM), son una tecnología prometedora, ya que son una variante de CCM que incluye una cámara intermedia adicional para producir electricidad limpia a partir de aguas residuales (desechos orgánicos) junto con la eliminación de sales de las aguas salobres de una manera amigable con el medio ambiente (Kokabian & Gude, 2015).

Consisten, como todos los sistemas bioelectroquímicos, de dos electrodos, un ánodo y un cátodo, que están unidos por un cable externo formando un circuito eléctrico completo, además los compartimientos o cámaras que contienen a los electrodos están separadas por una membrana permeable solo a protones (Bond & Lovley, 2003).

1.12 Componentes de los sistemas bioelectroquímicos

Todos los sistemas bioelectroquímicos (SBE) consisten de dos electrodos, un ánodo y un cátodo, que están unidos por un cable externo formando un circuito eléctrico completo, además los compartimientos o cámaras que contienen a los electrodos están separadas por una membrana permeable solo a protones (Bond & Lovley, 2003).

1.12.1 Electroodos

Los electrodos son componentes clave en la determinación del desempeño y costo de los sistemas bioelectroquímicos. El diseño de estos sigue siendo el mayor reto para convertir a las CCM en una tecnología rentable y escalable. Su material base ha de ser buen conductor, con buena estabilidad química, alta resistencia al esfuerzo mecánico, y preferiblemente de bajo costo. Estas condiciones, son cumplidas generalmente por materiales como el carbón y los metales no corrosivos; de ahí que sean los más empleados (Wei et al., 2011).

1.12.2 Membrana de intercambio catiónico (CEM)

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 católito (Logan, 2008).

1.13 Fundamentos de los sistemas bioelectroquímicos

En la cámara anódica los microorganismos crecen y oxidan el sustrato disponible en condiciones anaerobias, liberan electrones, protones y CO₂ al medio. Los protones se dirigen a la cámara catódica atravesando la membrana de intercambio protónico, y al mismo tiempo los electrones son dirigidos al ánodo, gracias a la habilidad que tienen algunos microorganismos de transferir electrones fuera de la célula, lo que se conoce como transferencia de electrones extracelular, TEE (Rabay et al, 2010).

Una vez en el ánodo viajan al cátodo a través del cable externo que conecta a los electrodos, cuando los electrones llegan al cátodo en condiciones aerobias, se combinan con los protones para reducir moléculas de oxígeno hasta formar agua, lo que crea un flujo de corriente eléctrica (Rabaey & Vestraete, 2005).

Cuando el oxígeno u otras moléculas aceptoras, como nitratos o sulfatos, están presentes en la cámara catódica, la generación de corriente eléctrica es producida, pero si no están presentes, la generación no es espontánea. Los electrones que llegan al cátodo reducen alguna molécula para completar el proceso de óxido-reducción (que comenzó en el ánodo) y estimular la generación de corriente eléctrica (Pant et al., 2012).

1.14 Parámetros que afectan el desempeño de los sistemas bioelectroquímicos

El desempeño de los sistemas bioelectroquímicos (SBE) depende de múltiples parámetros físicos, químicos, biológicos y operativos. Estos factores afectan la eficiencia de conversión energética, la eliminación de contaminantes y la estabilidad del sistema.

Sigue siendo el reto de quienes se dedican al estudio de las CCM, que con el control adecuado de los parámetros de operación, se disminuyan costos, se trate la mayor cantidad posible de agua residual (de ser este el combustible), y que se obtenga la mayor cantidad de energía. A continuación, se detallan los parámetros clave:

- **Temperatura:** la temperatura es un parámetro crítico en los sistemas bioelectroquímicos (SBE) debido a su impacto directo en las reacciones biológicas y electroquímicas. Las reacciones microbianas en los sistemas bioelectroquímicos (SBE) pueden llevarse a cabo en un amplio rango de temperaturas, dependiendo de la tolerancia de los microorganismos involucrados. Por ejemplo, los microorganismos mesófilos, que incluyen a la mayoría de los microorganismos electroactivos, operan de manera óptima en un rango de temperatura de 20 a 40 °C, donde se observa el mejor desempeño de los SBE. Un caso representativo es *Geobacter sulfurreducens*, que alcanza su máxima eficiencia a temperaturas cercanas a los 30 °C. En condiciones de temperaturas más altas, entre 50 y 60 °C, los microorganismos termófilos son los responsables de la actividad biológica, mientras que en temperaturas inferiores a 15 °C, los microorganismos

psicrófilos son predominantes. Sin embargo, los sistemas operados a bajas temperaturas tienden a mostrar un rendimiento reducido, principalmente debido a la disminución del metabolismo microbiano bajo estas condiciones (Aelterman et al., 2006).

- **Carga Orgánica:** se refiere a la cantidad de materia orgánica presente en el sustrato (generalmente medida como Demanda Química de Oxígeno [DQO], Demanda Bioquímica de Oxígeno [DBO], o Carbono Orgánico Total [COT]). Este parámetro es fundamental en los sistemas bioelectroquímicos (SBE), ya que influye en la actividad metabólica de los microorganismos electroactivos y, por ende, en la eficiencia de conversión de energía y tratamiento (Oh & Logan, 2005). 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).
- **Conductividad Eléctrica:** parámetro clave en los sistemas bioelectroquímicos (SBE), ya que afecta directamente la resistencia interna del sistema y, en consecuencia, la eficiencia de transferencia de electrones. Una alta conductividad permite un mejor transporte de iones entre el ánodo y el cátodo, lo que mejora el desempeño general del sistema. La presencia de iones como Na^+ , K^+ , Cl^- o SO_4^{2-} en el electrolito aumenta la conductividad. A mayor temperatura, la conductividad del electrolito aumenta debido a la menor viscosidad del agua y la mayor movilidad iónica (Torres et al., 2008).
- **pH:** es uno de los parámetros más importantes ya que afecta tanto las reacciones biológicas como las electroquímicas. Un pH desajustado puede inhibir el crecimiento microbiano, disminuir la eficiencia de transferencia de electrones y alterar la actividad catalítica de los electrodos. Un pH neutro de 6.5 – 7.5 es el rango óptimo para la mayoría de los microorganismos electroactivos (Gil et al., 2003).

CAPÍTULO II

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Ubicación del experimento

Esta investigación se llevó a cabo en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), en el Laboratorio de Química de Suelos, del Departamento de Ciencias del Suelo con las siguientes coordenadas, latitud: 25.353739453837193, longitud: -101.03391727561818, en Saltillo, Coahuila.

2.2 Materiales

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 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 catolítica (oxigenando la solución de forma externa con una bomba de aire acoplada a un difusor). En el compartimento anódico se colocó otra pieza de fieltro de grafito como ánodo, y 1000 mL de nejayote como sustrato (e inóculo). Las características fisicoquímicas del nejayote se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Características fisicoquímicas del nejayote.

Parámetros	Valores	Unidades
pH	8.20	-
Conductividad eléctrica (CE)	0.917	dS/m
Fosfatos (H₂PO₄)	5	ppm
Cobre (Cu)	0	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	120	ppm
Alcalinidad	80	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).

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIONES

En este apartado se exponen y analizan los resultados obtenidos a partir del uso de celdas de combustible microbianas (CCM) equipadas con electrodos de fieltro de grafito para el tratamiento de nejayote y la generación de energía eléctrica. Los resultados se ordenan en torno a los principales parámetros evaluados: voltaje, densidad de potencia, eficiencia de remoción de (DQO) y eficiencia coulombica, en función de los objetivos planteados en esta investigación.

3.1 Voltaje

La Figura 1 muestra la cinética de generación de voltaje en la CCM empacada con electrodos de fieltro de grafito durante el tratamiento de nejayote. La celda de combustible microbiana alcanzó un voltaje máximo de 88.2 mV a las 432 horas. Posteriormente, el voltaje disminuyó de manera constante, apreciándose ligeras fluctuaciones hasta alcanzar un mínimo de 16.03 mV alrededor de las 600 h de trabajo. Este comportamiento es esperado considerando que la producción de energía eléctrica en sistemas bioelectroquímicos esta fuertemente relacionada a la concentración de materia orgánica en la muestra.

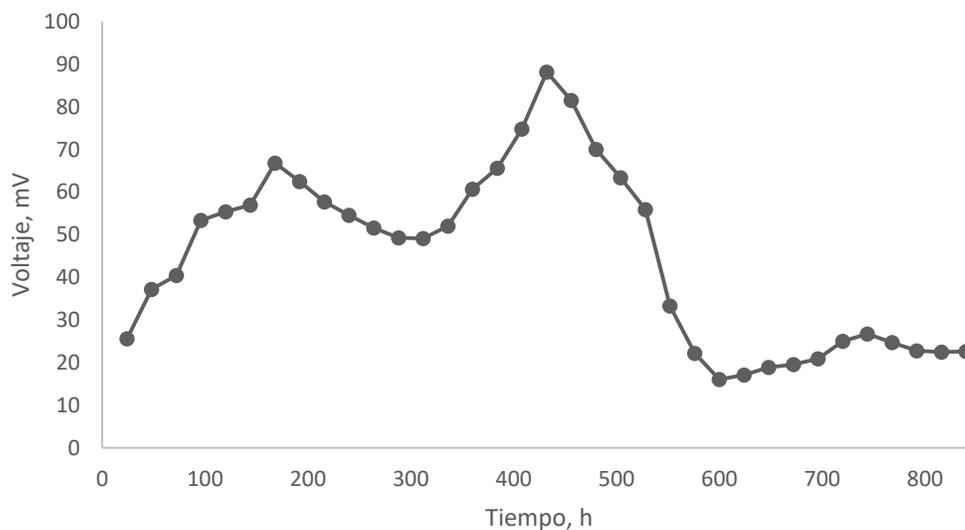


Figura 1. Generación de voltaje en la CCM.

Páez et al. (2019), aseguran que las condiciones más favorables para la producción de electricidad y una disminución de la DQO en SBE se logran al utilizar materiales carbonosos como electrodos. En la literatura se observan claras diferencias en cuanto al rendimiento eléctrico de las CCM, debido a que son varios los aspectos que lo afectan, entre ellos: la arquitectura (Rismani et al., 2011), el tipo de separador utilizado (Sharma y Li, 2010), el material de los electrodos (Hou et al., 2012), el sustrato (Choi et al., 2003; Bond y Lovley, 2003; Chaudhuri et al., 2003) y el inoculo (Rabaey y Verstraete, 2005).

3.2 Densidad de Potencia

La Figura 2 muestra la densidad de potencia volumétrica generada en la CCM. Los resultados muestran que este sistema logró generar un valor máximo de 7.78 mW/m³ a las 432 horas. De forma similar que, con el voltaje, este valor incrementó de forma constante en función de la adaptación de la microbiota al sustrato utilizado (nejayote) para posteriormente disminuir de forma lineal al empezar a existir una deficiencia de materia orgánica asimilable en la muestra.

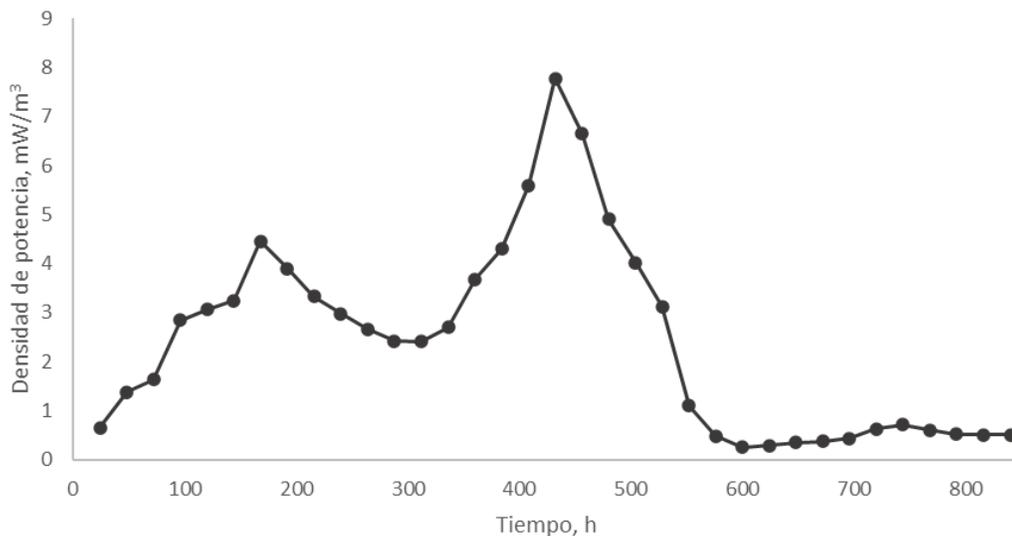


Figura 2. Densidad de potencia volumétrica generada en la CCM.

Debabov (2008) afirma que, como resultado de los avances de los últimos 10 años, la densidad de potencia de las CCM ha incrementado en diferentes órdenes de magnitud, de 0.1 mW/m² a 4.3 W/m². Catalina (2021) utilizó fieltro de grafito como material de fabricación de electrodos en un SBE debido a sus excelentes características (alta transferencia de electrones y gran desempeño) obteniendo una densidad de potencia máxima de 1030 mW/m². De manera similar Moon et al. (2006), Yu et al. (2012) y Ha et al. (2012) observaron resultados prometedores al utilizar este tipo de electrodos en CCM (560 mW/m², 754 mW/m² y 1000 mW/m², respectivamente). En la tabla 5 se presenta un análisis comparativo del desempeño obtenido en trabajos similares a lo abordado en este trabajo.

Tabla 5. Análisis comparativo del desempeño obtenido en estudios similares a lo realizado en este trabajo.

Sustrato	Inoculo	Tipo de electrodo	Densidad de potencia (mW/m²)	Referencia
Lixiviado	Lixiviado	Tela de carbón	33.4	Greenman et al., 2009
Glucosa	Bacterias contenidas en agua residual	Fibra de carbón	1430	Logan et al., 2007
Acetato, aguas residuales	Mezcla de bacterias	Fibra de carbono	6860	Fan et al., 2008
Glucosa	Lodo metanogénico, anaerobio, granular	Varilla de grafito, 5 mm de diámetro.	4310	Rabaey et al., 2004

Lactato	<i>Shewanella oneidensis</i>	Carbón reticulado vítreo	24	Ringeisen et al., 2006
Glucosa y acetato	Lodo de digestor anaeróbico	Filtro de carbono suspendido en varilla de grafito	3650	Borole et al., 2009
Acetato	<i>Geobacter sulfurreducens</i> KN400	Varilla, tela de grafito	3900	Yi et al., 2009
Acetato	Lodo anaeróbico	Papel carbón	7200	Oh et al., 2004

En este análisis comparativo de densidades de potencia, podemos observar que los resultados obtenidos en esta investigación son muy bajos. Esto puede ser debido a diferentes razones, por ejemplo: una acumulación de productos inhibidores, donde durante el metabolismo microbiano, pueden acumularse productos como ácidos orgánicos que inhiben la actividad de las bacterias y por ende, afectan la producción de electricidad o bien la degradación del sustrato insuficiente. Si el sustrato no se degrada eficientemente, habrá menos electrones disponibles para ser transferidos al ánodo, disminuyendo así la densidad de potencia.

3.3 Eficiencia de Remoción de DQO

La Tabla 6 muestra la eficiencia de remoción de la demanda química de oxígeno (DQO) en la CCM. La celda de combustible microbiana logró remover un 51.38 % de la DQO presente en el sistema. Los valores obtenidos se encuentran dentro de la media con respecto a otros trabajos reportados en la literatura (tabla 7).

Tabla 6. Eficiencia de Remoción de DQO (g/L) en la CCM.

DQO C₀	DQO C_f	Remoción (g/L)
20.979	10.2	10.779

Buitrón & Pérez (2011) evaluaron como material anódico el papel de grafito, donde en promedio, se obtuvo una eficiencia de eliminación de materia orgánica del 71% al utilizar agua residual municipal como sustrato. La duración del ciclo fue de 0.97 días para la celda de 40 mL, 1.03 días para la celda de 80 mL y 5.93 días para la celda de 120 mL. El aumento de distancia entre los electrodos (4, 8 y 12 cm) no causó un efecto negativo en la generación de electricidad, pues en la mayor separación (celda de 120 mL) se alcanzó un voltaje máximo de 660 mV, mientras que para las celdas de 40 y 80 mL fue de 540 mV y 532 mV, respectivamente., Lo anterior, concuerda con lo reportado en este experimento, siendo nuestros resultados más destacables al considerar la diferencia en la complejidad entre sustratos utilizados en cada trabajo.

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

Tipo de celda	Sustrato	Remoción de DQO (%)	Autores
Celda de combustible microbiana	Residuos de alimentos y aguas residuales domésticas.	88.2	Chuen et al. (2018).

Celda de combustible microbiana - Fotobiorreactor	Aguas residuales domesticas	85	Jiang et al. (2012)
Celda de combustible microbiana de doble cámara	Aguas residuales domesticas	65	Lefebvre et al. (2008)
Celda de combustible microbiana de una sola cámara	Agua residual	70	(Buitron & Perez, 2011).
Celda de combustible microbiana de doble cámara	Aguas residuales domesticas	60	Martínez et al. (2015).
Celda de combustible microbiana de doble cámara	Nejayote	51.38	Este trabajo

3.4 Eficiencia Coulómbica

La eficiencia coulómbica (EC) obtenida en este trabajo fue de 0.102 %. Este valor indica que solo una pequeña fracción de los electrones generados por la oxidación de la materia orgánica fueron recuperados en forma de energía eléctrica. Aunque este porcentaje es bajo, es un resultado esperado considerado factores como la alta complejidad del sustrato y la falta de un inóculo especializado en la generación de energía eléctrica.

Por otra parte, las eficiencias coulómbicas reportadas en celdas de combustibles microbianas que registra la literatura varían, pero en general, tienden a aumentar

con la densidad de potencia porque hay menos tiempo para que se pierda sustrato debido a la competencia en procesos físicos y biológicos (Logan y Regan, 2006). La tabla 8 muestra un análisis comparativo de EC obtenidas en trabajos similares a lo abordado en este trabajo.

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

Tipo de celda	Sustrato	Cultivo	Tipo de electrodo	EC (%)	Autores
Celda de combustible microbiana	Acetato	Bacterias presentes en agua residual doméstica	Papel carbón	65	Min y Logan, 2004
Celda de combustible microbiana	Lactato	<i>Shewanella oneidensis</i>	Carbón reticulado vítreo	2.4	Ringeisen et al., 2006
Celda de combustible microbiana	Acetato	Lodos activados	Papel carbón	63-78	Oh et al., 2004
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	Glucosa	Cultivo mixto	Grafito plano	89	Rabaey et al., 2003

Celda de combustible microbiana de una sola cámara	Peptona	Bacterias presentes en agua residual doméstica	Papel carbón	6	Heilmann & Logan, 2006
Celda de combustible microbiana de dos cámaras.	Nejayote	Bacterias presentes en nejayote	Filtro de grafito	0.102	Este trabajo

La tabla 8 muestra las eficiencias reportadas por otros estudios y se puede observar como de acuerdo al tipo de sustrato empleado varían las eficiencias producidas. Por ejemplo, con lactato se obtuvieron eficiencias de 2.4% (Ringeisen et al., 2006), con peptona 6% (Heilmann & Logan 2006) y con agua residual domestica de 3-12% Liu et al., 2004, (Rabaey et al., 2003).

CONCLUSIÓN

La finalidad de esta investigación fue evaluar el rendimiento de las celdas de combustible microbianas utilizando electrodos de fieltro de grafito en el tratamiento de nejayote. Los resultados mostraron una generación de voltaje máxima de 88.2 mV y una eficiencia de remoción de DQO de 51.38%, lo que demuestra que este sistema es viable para la conversión de materia orgánica en energía. Sin embargo, la baja eficiencia coulombica observada en este estudio (0.1024%) indica que aún existen oportunidades de mejora, especialmente en la optimización de los procesos de transferencia de electrones.

El estudio estuvo limitado por factores como el tiempo y las condiciones de este sistema. Un punto clave a mejorar en próximos estudios es aumentar el área del ánodo para compensar las pérdidas por muerte y espacio ocupado por otras bacterias no generadoras de electricidad. Se recomienda llevar a cabo la implementación de cultivos mixtos ya que podría ser una solución para aumentar la población de microorganismos que favorezcan la producción de energía eléctrica, contribuyendo así a la degradación de los contaminantes en el agua de nejayote.

Los resultados obtenidos permitieron concluir que la hipótesis de la presente investigación se cumple ya que se evidenció que el tipo de electrodo utilizado dentro de una CCM afecta en la generación de energía eléctrica.

Esta investigación aporta evidencia sobre la posibilidad de utilizar residuos agroindustriales como el nejayote para la producción de energía limpia mediante celdas de combustible microbianas. Este enfoque no solo podría ofrecer una solución sostenible para el tratamiento de aguas residuales, sino también representar una fuente de energía renovable en pequeña escala.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aelterman et al. (15 de May de 2006). Continuous electricity generation at high voltages and currents using stacked microbial fuel cells. *Environmental Science & Technology*, 40(10), 3388-3394.
- Aguilar et al. (Feb/mar de 2016). Estado actual de los sistemas bioelectroquímicos: factibilidad de su uso para aumentar la producción ruminal de propionato. *Agrociencia*, 50(2), 149-166.
- ASERCA. (23 de Agosto de 2018). *Gobierno de México*. Obtenido de <https://www.gob.mx/aserca/articulos/maiz-grano-cultivo-representativo-de-mexico#:~:text=El%20ma%C3%ADz%2C%20es%20uno%20de,importancia%20econ%C3%B3mica%2C%20social%20y%20cultural>.
- Astiasarán et al. (1999). *Alimentos, composición y propiedades*. Madrid, España: Ed. Mc Graw-Hill, Interamericana.
- Barros, C. (2008). Maíz, Naturaleza y Cultura. En *Diario de campo* (págs. 64-70). México: Coordinación Nacional de Antropología.
- Bermudez, M. A., & Bernal, E. D. (2018). IMPLEMENTACIÓN DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA A ESCALA LABORATORIO PARA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.
- Bond, D. R., & Lovley, D. R. (2003). Electricity Production by *Geobacter sulfurreducens* Attached to Electrodes. *Applied and Environmental Microbiology*, 1548-1555.
- Buitron, G., & Perez, J. (2011). PRODUCCIÓN DE ELECTRICIDAD EN CELDAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANAS UTILIZANDO AGUA RESIDUAL: EFECTO DE LA DISTANCIA ENTRE ELECTRODOS. *Tip Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 5-11.
- Burge , R. M., & Duesing, W. J. (1989). Processing and dietary fiber ingredient applications of corn bran. *Cereal foods world*, 34: 535-538.
- Cao et al. (24 de July de 2009). A new method for water desalination using microbial desalination cells. *Environmental Science & Technology*, 43(18), 7148–7152.
- CIAD. (29 de 9 de 2023). *Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías*. Obtenido de CGobierno de México: <https://www.ciad.mx/la-importancia-del-dia-nacional-del-maiz/>

- Droguí et al. (2022). *Electro-Coagulation and Electro-Oxidation in Water and Wastewater Treatment*. ASCE.
- Forero et al. (Diciembre de 2005). Aplicación de procesos de oxidación avanzada como tratamiento de fenol en aguas residuales industriales de refinería. *CT&F Ciencia, Tecnología y Futuro*, 3(1), 97-109.
- Garces et al. (junio de 2004). La fotocatalisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Lasallista de Investigación*, 1(1), 83-92.
- Gil et al. (2003). Operational parameters affecting the performance of a mediator-less microbial fuel cell. *Biosensors and Bioelectronics*, 18(4), 327-334.
- González et al. (2010). Tratamiento de nejayote por coagulación-floculación. *Ingeniería Ambiental*, 21(2), 67-75.
- Jiménez, G. (2023, Diciembre). *APROVECHAMIENTO DEL NEJAYOTE COMO FUENTE MICROBIANA Y NUTRITIVA EN Opuntia ficus-indica*. (Tesis de Licenciatura): BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA.
- Judd, S. (2010). *The MBR Book: Principles and Applications of Membrane Bioreactors for Water and Wastewater Treatment*. Oxford.: Butterworth-Heinemann.
- Kokabian, B., & Gude, V. G. (15 of February de 2015). Sustainable photosynthetic biocathode in microbial desalination cells. *Chemical Engineering Journal*, 262, 958-965.
- Legrini et al. (1 de March de 1993). Photochemical processes for water treatment. *Chemical Reviews*, 93(2), 671–698.
- León, A. E., & Rosell, C. (2007). DE TALES HARINAS, TALES PANES: granos, harinas y productos de panificación en Iberoamérica. Córdoba: ISEKI-COMIDA.
- 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 et al., L. (2004). Production of Electricity during Wastewater Treatment Using Fluidized-Bed Microbial Fuel Cells. *Ciencia y tecnología ambientales*, 2281-2285.
- Logan. (February de 2008). *Microbial Fuel Cells*. Wiley, 216.
- Logan et al. (14 de July de 2006). Microbial Fuel Cells: Methodology and Technology. *Environmental Science & Technology*, 40(17), 5181–5192.
- Logan et al. (1 de September de 2006). Microbial Fuel Cells—Challenges and Applications. *Environmental Science & Technology*, 40(17), 5172–5180.

- 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.
- Mendoza, S., & Gutiérrez, E. (2004). Evaluación de diferentes técnicas para el tratamiento del nejayote en pequeñas industrias. *Ciencia y Tecnología Alimentaria*, 14(2), 201-210.
- México. Secretaria de Fomento, C. e. (1898). Anuario estadístico de la Republica Mexicana.
- Nevin et al. (26 de May de 2010). Microbial electrosynthesis: feeding microbes electricity to convert carbon dioxide and water to multicarbon extracellular organic compounds. *mBio*, 1(2), 00103-10.
- Oh et al. (2004). Cathode performance as a factor in electricity generation in microbial fuel cells. *Env Sci Technol* 38, 348-355.
- Oh, S. E., & Logan, B. E. (November de 2005). Hydrogen and electricity production from a food processing wastewater using fermentation and microbial fuel cell technologies. *Water Research*, 39(19), 4673-4682.
- Orús, A. (13 de Marzo de 2024). *Los diez países con mayor producción de maíz en el mundo en el 2022*. Obtenido de Statista: <https://es.statista.com/estadisticas/613419/principales-productores-de-maiz-en-el-mundo/>
- Paliwal, R. (2001). *El maíz en los trópicos: Mejoramiento y producción*. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Pant et al. (2012). Bioelectrochemical systems (BES) for sustainable energy production and product recovery from organic wastes and industrial wastewaters. *RSC Adv.*, 1248-1263.
- Paredes et al. (2010). La nixtamalización y el valor nutritivo del maíz. *Ciencias*, 63.
- Pérez, N. C. (2012). *POTENCIAL DEL CONCENTRADO DE NEJAYOTE PRE-TRATADO COMO SUSTRATO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL*. Hermosillo, Sonora.
- Rabaey. (2007). Microbial ecology meets electrochemistry: Electricity-driven and driving communities. *The ISME*, 9-18.
- Rabaey, K., & Vestraete, W. (June de 2005). Microbial fuel cells: novel biotechnology for energy generation. *Trends in Biotechnology*, 23(6), 291-298.
- Rabay et al. (2010). Bioelectrochemical systems: From extracellular electron transfer to biotechnological applicaiton. *Integrated Environmental Technology Series*, 1-16.

- Reyes, C. P. (1990). El maíz y su cultivo. En P. Reyes Castañeda, *El maíz y su cultivo* (pág. 460). D F México: AGT Editor.
- Reyes, C., & Paredes, O. (1993). Tratamiento biológico del nejayote para la obtención de productos de valor agregado. *Revista de Biotecnología*, 5(4), 277-284.
- 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. doi:10.1016/j.jpowsour.2007.01.054
- Rojas, M., & Utrilla, J. R. (2008). Tratamiento de nejayote utilizando un sistema de lodos activados. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 7(1), 43-50.
- Rosentrater, K. A. (2006). A review of corn masa processing residues: Generation, properties, and potential utilization. *Waste Management* 26, 284-292.
- Rozendal et al. (February de 2006). Principle and perspectives of hydrogen production through biocatalyzed electrolysis. *Hydrogen Energy*, 31, 1632-1640.
- SADER. (3 de Marzo de 2018). *Gobierno de México*. Obtenido de <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/maiz-grano-la-importancia-de-llamarse-maiz>
- SADER. (10 de Marzo de 2023). *Gobierno de México*. Obtenido de <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/maiz-cultivo-de-mexico>.
- Salazar, C., & Ascencio, F. (2011). Estrategias para el tratamiento del nejayote en la industria de la masa y la tortilla. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 2(3), 115-122.
- Schievano et al. (November de 2016). Electro-Fermentation – Merging Electrochemistry with Fermentation in Industrial Applications. *Trends in Biotechnology*, 34(11), 866-878.
- Sevda, S., & Sreerishnan. (2012). Effect of salt concentration and mediators in salt bridge microbial fuel cell for electricity generation from synthetic wastewater. *ournal of environmental science and health. Part A, Toxic/hazardous substances & environmental engineering*, 47(6), 878-886. doi:10.1080/10934529.2012.665004
- Torres et al. (1 de Aug de 2008). Proton transport inside the biofilm limits electrical current generation by anode-respiring bacteria. *Biotechnology and Bioengineering*, 100(5), 872-881.
- 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, H., & Ren, Z. J. (December de 2013). A comprehensive review of microbial electrochemical systems as a platform technology. *Biotechnology Advances*, 31(8), 1796-1807.

Wang, J., & Wang, Q. (2019). Intelligent explicit model predictive control based on machine learning for microbial desalination cells. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 233(7), 751–763.

Watson. (1987). Structure and composition corn, chemistry and technology, Am. Assoc. *Cereal Foods World*, 53-82.

Wei et al. (October de 2011). Recent progress in electrodes for microbial fuel cells. *Bioresource Technology*, 102(20), 9335-9344.