

Exploración del potencial energético de las celdas microbianas: análisis de avances y limitaciones

Exploration of the energy potential of microbial cells: Analysis of advances and limitations

Maricielo Vera^{1*} , Mayra Pisconte¹ ,
Alexia Seminario¹  y Gustavo Quique¹ 

1 Carrera de Ingeniería Ambiental, Universidad Científica del Sur. Lima, Perú.



Citar como: Vera *et al.* (2024). «Exploración del potencial energético de las celdas microbianas: análisis de avances y limitaciones». *South Sustainability*, 5(2) e105.
DOI: 10.21142/SS-0502-2024-e105

Artículo recibido: 1/6/2024
Revisado por pares
Artículo aceptado: 20/8/2024



© Los autores, 2024. Publicado por la Universidad Científica del Sur (Lima, Perú)

* E-mail de correspondencia:
100065876@cientifica.edu.pe

RESUMEN

El acceso a la electricidad es vital para el desarrollo humano. Sin embargo, sigue siendo un desafío para muchas personas en todo el mundo. En este sentido, el uso de residuos orgánicos se presenta como una oportunidad en el ámbito energético por medio de las celdas microbianas (Microbial Fuel Cells, MFC), las cuales convierten los residuos orgánicos en electricidad al aprovechar microorganismos que liberan electrones y descomponen la materia orgánica. Por ello, el objetivo de esta investigación fue describir el estado actual y las tendencias futuras en la aplicación de celdas microbianas, abordando la diversidad de técnicas, sustratos utilizados para mejorar la eficiencia en la producción de electricidad, así como sus aplicaciones futuras y limitaciones actuales. Para ello se realizó una búsqueda en los portales de SciELO, Scopus y ScienceDirect, en un intervalo específico de años, 2014-2023. A pesar del éxito demostrado por las bioceldas en el tratamiento de aguas residuales y en humedales construidos, su rendimiento se ve influenciado por diversos factores, como el tipo de separador y material del electrodo, así como por parámetros químicos como pH, temperatura y salinidad. Además, el costo del material del ánodo actualmente limita su aplicación a gran escala. En conclusión, las bioceldas representan una prometedora solución para la generación de energía sostenible a partir de residuos orgánicos, aunque se requiere un mayor desarrollo investigativo para superar las limitaciones actuales y lograr una implementación más amplia y precisa en el futuro.

Palabras clave: bioenergía, microorganismos, bioceldas, sustratos, eficiencia

ABSTRACT

Access to electricity is vital for human development; however, it remains a challenge for many people worldwide. In this context, organic waste represents an opportunity in the energy sector through the use of microbial fuel cells (MFCs), which convert organic waste into electricity by harnessing microorganisms that release electrons and break down organic matter. Therefore, the aim of this research was to describe the current situation and future trends in the application of microbial fuel cells, addressing the diversity of techniques and the substrates used to improve efficiency in electricity production, as well as their future applications and current limitations. To this end, a search was conducted on the Scielo, Scopus and Science Direct portals, within a specific time frame ranging from 2014 to 2023. Despite the proven success of microbial fuel cell use in wastewater treatment and constructed wetlands, their performance is influenced by a number of factors, such as the type of separator and electrode material employed, as well as chemical parameters such as pH, temperature and salinity. In addition, the costs associated with anode materials currently limit their large-scale application. In conclusion, microbial fuel cells represent a promising solution for sustainable energy generation from organic waste, although further research will be needed to overcome current limitations and achieve broader and more precise implementation going forward.

Keywords: bioenergy, microorganisms, biocells, substrates, efficiency



Introducción

A través de los años, la electricidad ha sido crucial para el desarrollo humano al facilitar actividades cotidianas, pero su acceso sigue siendo un problema, lo que afecta aproximadamente al 13 % de la población mundial (Nolasco y Gomis, 2021). Además, la generación de gases de efecto invernadero ha aumentado un 2,7 % anual desde 1990 debido al uso de combustibles fósiles (Venegas et al., 2019). En este escenario, se alza un desafío adicional, la gestión de residuos sólidos y aguas residuales, debido a que su incorrecta gestión tiene un impacto negativo en los ecosistemas y en la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) (Obileke et al., 2021). A pesar de ello, esta problemática puede considerarse una oportunidad en el ámbito energético, especialmente para abordar la falta de acceso eléctrico y reducir las emisiones de GEI (Sánchez et al., 2021).

Por ese motivo, surge la propuesta de transformar las aguas residuales y los desechos sólidos en posibles fuentes de energía (Kumar et al., 2023). Ante ello adquieren relevancia tecnologías como las celdas microbianas (Microbial Fuel Cells, MFC), las cuales son capaces de convertir estos desechos en recursos valiosos mediante procesos biológicos eficientes y sostenibles, generando electricidad como subproducto (Sánchez et al., 2021). Existen ciertas especies bacterianas, conocidas como microorganismos electrogénicos o agentes bioelectroquímicos, que destacan por su capacidad de liberar electrones al descomponer materia orgánica (Kurniawan et al., 2022). Esta habilidad única ha despertado un gran interés debido a su potencial para convertir reacciones metabólicas en corrientes eléctricas aprovechables, participando así en la producción de energía en celdas microbianas y otros dispositivos electroquímicos (Wang et al., 2022).

La relevancia de las MFC en el contexto de la generación de energía sostenible es innegable, ya que permiten la conversión eficiente de residuos orgánicos, como aguas residuales o biomasa, en electricidad (Yaqoob et al., 2020; Savla et al., 2021). Este enfoque no solo reduce los residuos, sino que también produce energía limpia y renovable simultáneamente. Además, tienen aplicaciones en áreas remotas sin acceso a la red eléctrica convencional, lo que podría revolucionar la sostenibilidad energética y medioambiental al funcionar en diversas condiciones ambientales y mejorar la eficiencia de la transferencia de electrones (Yaqoob et al., 2020; Kurniawan et al., 2022).

El objetivo de esta investigación fue describir el estado actual y las tendencias futuras en la aplicación de celdas microbianas, al abordar la diversidad de técnicas, sustratos utilizados para mejorar la eficiencia en la producción de electricidad, así como sus aplicaciones futuras y limitaciones actuales.

Metodología

Se llevó a cabo una búsqueda de la literatura en tres principales bases de datos, SciELO, Scopus y ScienceDirect, enfocándose en artículos tanto de revisión como de investigación de los últimos nueve años (2014-2023). Se emplearon términos clave como «MFC», «substrate», «sustrato», «bioceldas», «biocells», «eficiencia» y «efficiency» para localizar literatura relevante. La búsqueda se optimizó mediante el uso de operadores booleanos «AND» y «OR», que facilitaron la expansión del alcance de los resultados, así como la combinación de términos para generar diversas ecuaciones de búsqueda. Para el análisis de los artículos seleccionados se desarrolló un esquema lógico que facilitó una visión completa del estado actual y las tendencias futuras en la aplicación de celdas microbianas (figura 1).

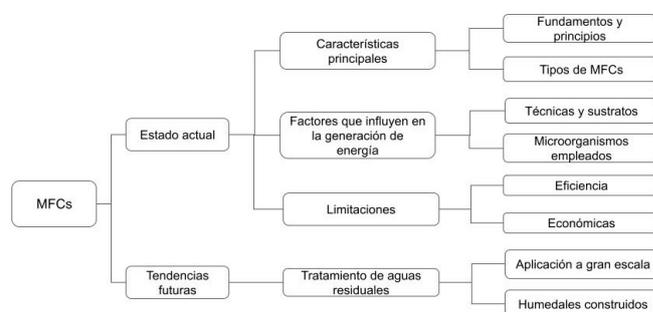


Figura 1. Esquema del proceso conceptual de descripción del estado actual y las tendencias futuras en la aplicación de celdas microbianas

Con respecto al estado actual, se seleccionaron artículos que describieron las características fundamentales de esta tecnología, incluyendo sus principios básicos y los diseños predominantes utilizados. Asimismo, se evaluó la influencia del tipo de sustrato y consorcio microbiano en la producción de energía, evaluando la potencia eléctrica generada. Del mismo modo, se identificaron las limitaciones asociadas tanto con la eficiencia como con la viabilidad económica de los proyectos de celdas microbianas.

En cuanto a las tendencias futuras, se revisaron las aplicaciones más comunes de esta tecnología y se destacó el tratamiento de aguas residuales como uno de los campos más prometedores para la implementación de MFC. Se analizaron casos de éxito a gran escala en esta área y se resaltó el uso de humedales construidos como una solución innovadora que podría mejorar significativamente el rendimiento de las MFC. Esta metodología proporcionó una visión completa de los avances actuales y las perspectivas futuras en el ámbito de las celdas microbianas.

Resultados y discusiones

1. Características de las celdas microbianas

1.1. Fundamentos y principios

Las MFC son dispositivos electroquímicos ingeniosos que aprovechan la actividad metabólica de microorganismos, como las bacterias electroactivas, para convertir materia orgánica en energía eléctrica mediante la transferencia de electrones (Obileke *et al.*, 2021). Estas celdas constan de un ánodo y un cátodo separados por una membrana de intercambio de protones (Shabani *et al.*, 2020), y un circuito eléctrico externo entre los electrodos (ver figura 2). La particularidad de las MFC radica en lo siguiente: los electrones liberados por los microorganismos no se desperdician, sino que son conducidos a través de un circuito eléctrico externo hacia el cátodo (Prathiba *et al.*, 2022). En el cátodo, ocurre una reacción de reducción que se traduce en la generación de una corriente eléctrica aprovechable como fuente de energía (Mohan *et al.*, 2019).

Los electrodos utilizados en la construcción de una MFC son fundamentales en su rendimiento y eficiencia. Los materiales comúnmente empleados en los electrodos incluyen el carbono debido a su estabilidad química, alta conductividad, biocompatibilidad y bajo costo (Devi *et al.*, 2021; Liang *et al.*, 2020). Sin embargo, también se ha avanzado en el uso de nanocompuestos basados en materiales como el grafeno, la polianilina y los nanotubos de carbono, entre otros (Wilberforce *et al.*, 2022; Narayanasamy y Jayaprakash, 2021). Estos materiales contribuyen de manera significativa a optimizar el rendimiento de las MFC y su aplicabilidad en diversas escalas, lo que las convierte en dispositivos prometedores en el ámbito de la energía sostenible y renovable.

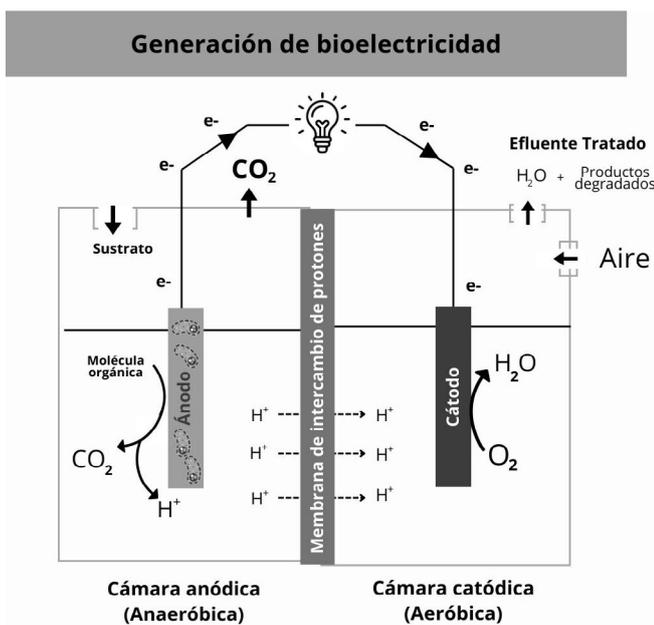


Figura 2. Esquema de funcionamiento de una celda de combustible microbiana (MFC)

1.2. Tipos de celdas microbianas

Las MFC presentan una variedad de diseños que buscan aprovechar la actividad microbiana en diferentes aplicaciones, desde la generación de energía hasta la purificación del agua (ver figura 3). Un diseño común es la MFC de una sola cámara, que se caracteriza por su simplicidad y bajo costo. En este diseño, el ánodo y el cátodo se encuentran en la misma cámara, sin una membrana de separación. Esta configuración sencilla facilita la construcción y reduce los costos de implementación. Sin embargo, se ha observado una tendencia a acidificarse debido a la acción microbiana (Din *et al.*, 2020). En contraste, la MFC de dos cámaras cuenta con una cámara anódica y una catódica conectadas por una membrana de intercambio o puente salino. Esta configuración permite el movimiento de protones hacia el cátodo y es el reactor más utilizado entre otros diseños (Bora *et al.*, 2022).

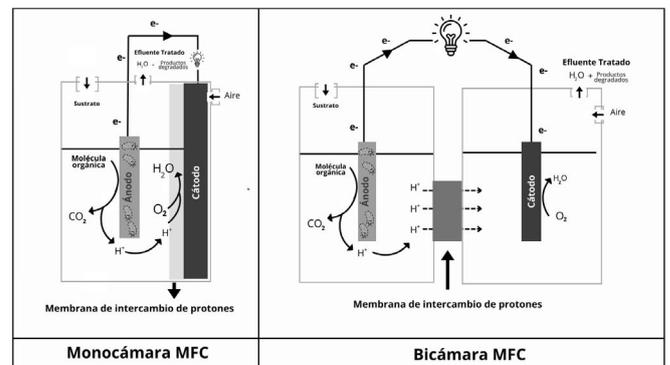


Figura 3. Diferencias entre una biocelda microbiana de una cámara y una de dos cámaras

Además, se ha explorado una MFC multicámara como estrategia para mejorar la eficiencia tanto en la eliminación de contaminantes como en la capacidad de generación de energía eléctrica. La conexión en serie o en paralelo de cámaras unitarias individuales puede aumentar significativamente la generación de corriente eléctrica (Hoang *et al.*, 2022). Los MFC apilados, con conexión en serie y en paralelo, exhiben variaciones en la salida de corriente (Kuleshova *et al.*, 2021). Aquellos conectados en paralelo muestran una corriente de cortocircuito más alta, lo que indica una mayor velocidad de reacción bioelectroquímica. La variación del cátodo también desempeña un papel crucial en el rendimiento de las celdas microbianas.

En el caso del MFC de cátodo abierto, los microorganismos oxidan materia orgánica y transfieren electrones al cátodo para generar electricidad. Este tipo de MFC se utiliza comúnmente en el tratamiento de aguas residuales y la generación de energía a partir de residuos orgánicos, y su rendimiento es influenciado por factores como la concentración de electrones, el tipo de receptor y la configuración del electrodo (Hoang *et al.*, 2022). En función del ánodo, se encuentran diferentes tipos de MFC,



como el de ánodo de polvo de grafito flexible y el cátodo compartido multiánodo MFC, que prefieren materiales anódicos con buena biocompatibilidad, alta conductividad y excelente estabilidad química (Halim *et al.*, 2020). Existen sistemas MFC integrados que aprovechan otras tecnologías. Los MFC de sedimentos no poseen membrana y aprovechan el potencial redox del suelo para generar energía y llevar a cabo procesos de biorremediación (Algar *et al.*, 2020).

Por otro lado, los MFC acoplados a humedales artificiales son innovadores para limpiar aguas residuales, aprovechando las diferencias en zonas aeróbicas y anaeróbicas, y generan electricidad como subproducto (Li *et al.*, 2019). En el ámbito de la electrólisis microbiana, las celdas microbianas de desalinización producen agua dulce y energía a partir de agua salada mediante mecanismos como la ósmosis directa y la electrólisis inversa con ánodo, cátodo y membrana selectiva de cationes (Singh *et al.*, 2019). De igual forma, los biorreactores de membrana MFC se utilizan en procesos de tratamiento de aguas residuales, empleando membranas para separar y purificar el agua. Por lo tanto, estas variaciones en el diseño y la función de las celdas microbianas exploran diversas aplicaciones de los microorganismos, desde la generación de energía hasta la purificación del agua.

2. Evaluación de la influencia de sustratos y microorganismos

2.1. Diversidad de técnicas y sustratos utilizados para mejorar la eficiencia en la producción de electricidad

Los microorganismos y los sustratos son fundamentales en las MFC. Los consorcios microbianos aseguran la generación de energía al desarrollar una biopelícula microbiana en la superficie del electrodo. Esto se demuestra en el estudio de Arkin *et al.* (2023), donde se cultivó un consorcio de bacterias compuesto por *Staphylococcus*, *Streptococcus* y *Staphylococcus*

epidermidis en un sustrato de orina, hasta lograr una producción de 1,72 W/m².

El informe de Moqsud y Okamoto (2023) plantea el uso de una pila de combustible microbiana en combinación con cultivos de maíz *Zea mays* L., teniendo como sustrato la rizodeposición de la planta. La comunidad microbiana presente en la zona de las raíces descompone estos exudados para producir electrones. Se utilizó carbón de bambú natural como materiales de electrodo que se colocaron de manera horizontal; los datos de voltaje se midieron durante 70 días, con un voltaje máximo de 0,32 (W/m²), lo que demostró que es posible utilizar los exudados de las plantas para generar bioenergía y la recolección del cultivo.

Estudios como los de Li *et al.* (2017) y Choi *et al.* (2014) aplican la ingeniería genética centrándose en *Shewanella oneidensis* usando xilosa y glucosa como sustrato, respectivamente, mejorando el flujo de electrones. Esto al agregar genes que codifican rutas metabólicas de microorganismos como *Z. mobilis*, concretamente la introducción de genes *glf* y *glk* para metabolizar la glucosa, que logran operar por 100 h hasta el máximo de corriente 0,085 mA y genes de *Scheffersomyces stipites* para el metabolizar xilosa, que logran generar 2,1 ± 0,1 mW/m². Los estudios presentados reflejan la amplia cantidad de metodologías para la obtención de bioenergía a partir de MFC. La de mayor eficiencia es el estudio realizado por Arkin (2017).

2.2. Impacto de los diferentes tipos de microorganismos en la eficiencia

El diseño de consorcios microbianos es una estrategia que mejora el rendimiento de los sistemas bioelectrónicos y facilita aplicaciones prácticas en la producción de bioenergía. Esto de acuerdo con el principio de diseño de «división del trabajo» que busca un consorcio microbiano con funciones complementarias para la generación

Tabla 1. Impacto del sustrato y el consorcio microbiano reflejado en el potencial eléctrico

Método	Sustrato	Composición	Especies	Potencia eléctrica W · m ⁻²	Referencia
Pilas de combustible microbiano (MFC)	Planta de maíz (<i>Zea mays</i>)	Tierra orgánica	<i>Shewanella oneidensis</i> .	0,32	Moqsud y Okamoto, 2023
Pilas de combustible microbiano (MFC)	Orina	95 % NH ₄ + -N y 85,8 % PO ₄ 3	<i>Staphylococcus</i> , <i>Streptococcus</i> , <i>Staphylococcus epidermidis</i>	1,72	Arkin <i>et al.</i> , 2023
Pilas de combustible microbiano (MFC)	Exudados radiculares de <i>Philodendro cordatum</i> y <i>Juncus effusus</i>	N/D	<i>Geobacter sulfurreducens</i> DL-1	0,075-0,107	Guadarrama-Pérez <i>et al.</i> , 2023
Pilas de combustible microbiano (MFC)	Xilosa	C5H10O5	<i>Shewanella oneidensis</i>	-2,1 ± 0,1	Li <i>et al.</i> , 2017
Pilas de combustible microbiano doble camara (MFC)	Glucosa	C ₆ H ₁₂ O ₆	<i>Shewanella oneidensis</i> <i>E. coli</i> <i>Zymomonas mobilis</i>	0,085	Donggeon <i>et al.</i> , 2014

eficiente de energía (Liu *et al.*, 2023). Los microorganismos pueden mejorar su eficiencia cooperando de forma sinérgica para aumentar la producción de energía, lo cual permite aplicaciones mediante consorcios con microorganismos exoelectrógenos; asimismo, son capaces de facilitar la generación de energía mediante la eliminación de sustancias químicas o la producción de sustrato que alimenta el proceso (Wang *et al.*, 2022).

3. Limitaciones en la generación de energía de las celdas microbianas

3.1. Factores que afectan la eficiencia de las MFC

El rendimiento de las MFC se ve afectado por factores como el material del electrodo y el separador. Son esenciales la baja resistencia, biocompatibilidad, estabilidad química y resistencia mecánica de los electrodos para una eficiencia óptima (Mahajan y Panwar, 2022). Por otro lado, el tipo de membrana, las condiciones de operación y el mecanismo de transferencia de electrones son factores importantes para el óptimo rendimiento de las celdas (Sánchez *et al.*, 2021).

La transferencia directa se ve afectada por la ubicación interna de los sitios activos en proteínas, y es más lenta que la transferencia indirecta, la cual utiliza mediadores electrónicos para extraer y transportar electrones al ánodo de manera más eficiente (Cao *et al.*, 2019). Del mismo modo, la aireación de la cámara catódica, esencial para el mecanismo de transferencia como aceptor de electrones, es importante, ya que facilita el secuestro de carbono y mitiga los efectos negativos del CO₂ (Din *et al.*, 2020).

Parámetros como el pH, la temperatura y la salinidad también son importantes para la generación de la electricidad. La acidez del electrólito, producto de un pH elevado, afecta el rendimiento de los biocatalizadores en las MFC; la temperatura afecta a las reacciones microbianas, en temperaturas de 20 a 35 °C hay mayor eficiencia que en un rango de 8 a 22 °C; la salinidad brinda alta conductividad e impacta en la transferencia de protones a través de la membrana intercambiadora de cationes (Gul *et al.*, 2021).

3.2. Limitaciones económicas

Los electrodos de ánodo en las MFC son clave para generar energía; no obstante, estos pueden estar compuestos de materiales costosos, especialmente si son empleados a gran escala o para aplicaciones industriales, lo que afecta significativamente el gasto total del proyecto (Gul *et al.*, 2021). Tal es el caso del grafeno, cuyo uso, a pesar de que mejora el rendimiento al promover el crecimiento bacteriano, es económicamente inviable, con un costo aproximado de 2000 US\$/m³ (Chen *et al.*, 2014; Yaqoob *et al.*, 2020).

De manera similar, metales costosos como plata, oro y platino representan una inversión significativa, motivando la búsqueda de alternativas económicamente viables, como compuestos metálicos y materiales de carbono naturales (Kang *et al.*, 2017). Un ejemplo de ello es el velo de carbono, un material de bajo costo con conductividad eléctrica aceptable y una estructura altamente porosa, que se presenta como una alternativa prometedora (Yaqoob *et al.*, 2020). En este contexto, es necesario que los electrodos estén conformados por materiales rentables y aplicables a diversas escalas. Uno de los elementos más utilizados en los últimos años es el carbono, debido a su alta conductividad, estabilidad química, biocompatibilidad y bajo costo (Sánchez *et al.*, 2021).

4. Avances en la generación de energía de las celdas microbianas

4.1. Tratamiento de agua residual

Actualmente, las tecnologías clásicas de tratamiento de aguas residuales consumen una gran cantidad de energía y recursos (Elhenawy *et al.*, 2022). Aquello ha causado la necesidad de proponer diversas alternativas de tratamiento como el uso de MFC.

Dichas celdas microbianas son capaces de catalizar la oxidación de la demanda química de oxígeno (DQO) presente en el agua residual y simultáneamente producir energía (Selvasembian *et al.*, 2022). Se ha observado que las aguas residuales que tienen un alto contenido de carbohidratos fácilmente degradables y altas cantidades de DQO tienen una mayor capacidad de producir energía (Munoz *et al.*, 2021). Los artículos expuestos en la tabla 2 demuestran la capacidad de las MFC de generar energía en el tratamiento de distintos tipos de aguas residuales; además, evalúan la potencia eléctrica y la eficiencia de remoción de DQO.

4.2. Aplicación a gran escala

Las MFC se han estudiado intensamente a escala de laboratorio; no obstante, el desarrollo futuro de esta tecnología requiere la ampliación del sistema en condiciones prácticas de campo (Ge y He, 2016). Lograr aplicar esta tecnología en el tratamiento de aguas residuales permitiría la creación de infraestructura que presente un consumo nulo de energía (Dong *et al.*, 2015). Para obtener un sistema eficiente es necesario desarrollar un sistema con la máxima superficie de electrodos en relación con el reactor, al igual que reducir las resistencias y la distancia entre electrodos (Ajit *et al.*, 2023). En la tabla 3 se pueden apreciar los trabajos que han llevado esta tecnología a la práctica en el tratamiento de grandes volúmenes de aguas residuales.



Tabla 2. Aplicación de MFC en el tratamiento de agua residual a nivel de laboratorio

Configuración de MFC	Potencia eléctrica (mW/m ² o W/m ³)	Eficiencia del tratamiento	Agua residual	Carga orgánica (gDQO/L)	Referencia
MFC de cátodo abierto	570 mW/m ²	90 +- 2 %	Industria pesquera	1,5 gDQO/L	Jamal et al., 2020
Sistema acoplado de cámara acidogénica-MFC	4,72 +- 0,10 W/m ³	78 %	Agroindustrial	1,6 gDQO/L	Raychaudhuri et al., 2022
MFC de doble cámara	3,28 W/m ³	88,50 %	Melaza	3,63 gDQO/L	Yang et al., 2022
MFC de ánodo de polvo de grafito flexible	59,21 mW/m ²	82 %	Doméstica	0,332 gDQO/L	Islam et al., 2023
MFC tubular	41 mW/m ³	44 %	Detergentes	4,435 gDQO/L	Almatouq et al., 2023
MFC tubular	86 mW/m ³	75 %	Láctea	2,79 gDQO/L	Almatouq et al., 2023
MFC de cátodo de aire con un reforzador-rectificador de bajo voltaje	125 W/m ³	69 +- 17 %	Doméstica	1,5 gDQO/L	Koffi y Okabe, 2022
	260 mW/m ²	87 %	Doméstica	2,5 gDQO/L	Karuppiah et al., 2022
MCF de cátodo de aire	65,4 mW/m ²	74 %	Doméstica	2,25 gDQO/L	Estrada et al., 2018
cátodo compartido multi ánodo MFC	9025 mW/m ²	60 +- 2,7 %	Doméstica	1,246 gDQO/L	Koffi y Okabe, 2022
MFC monocámara con cátodo de aire	360 mW/m ²	87 +- 5 %	Tratamiento hidrotérmico de madera	3,343 gDQO/L	Toczyłowska et al., 2018
MFC de una sola cámara y cátodo de tres aires	2 W/m ³	85,2 +- 1,3 %	Molino de aceite de olivo	1,2 gDQO/L	Antonopoulou et al., 2023
MFC con ánodo de Mo/MoS ₂ -CC	3,25 W/ m ²	8,2 %	Efluente anódico de otras MFCs	0,2 gDQO/L	Liu et al., 2023
MFC de doble cámara con fibra de carbono y electrodos modificados con NiCO ₂ O ₄ /polianilina	12,19 ± 0,59 mW/m ²	80,5 %	Aguas residuales sintéticas	0,5 gDQO/L	Narayanasam et al., 2021
MFC con rellenos de hierro-carbono (TPFC)	300,16 ± 12,12 mV	91,2 % ± 3,4 %	Aguas residuales industriales	2,783 gDQO/L	Dai et al., 2022
MCF de cátodo de aire	350,92 mW/m ²	70,05 %	Aguas residuales de cría	28,955 gDQO/L	Wang et al., 2022
MFC de una sola cámara	1,12 V	40 %	Agua residual de papa	0,025 gDQO/L	Din et al., 2020
MFC monocámara con cátodo de aire	389,0 mV	78,8 %	Agua residual con fenol	0,5 g/L	Shen et al., 2020
MFC de doble cámara con cátodo	1438,8 mW/m ²	78,12 %	Doméstica	N/D	Chen et al., 2023

Tabla 3. Aplicación a gran escala de MFC en el tratamiento de agua residual

Volumen (L)	Configuración de MFC	Potencia eléctrica (mW/m ² o W/m ³)	Eficiencia del tratamiento	Agua residual	Referencia
90	MFC con 5 módulos apilables	1, 0,097 kWh/m ³	87,6 % - 86,3 %	Aguas residuales de cervecera	Dong et al., 2015
200	MFC con 96 módulos apilables	0,081 W/m ³	79 +- 7 %	Aguas residuales municipales	Ge y He, 2016
720	MFC con 5 módulos apilables	7,29 ± 0,7 mW/m ²	78,45 % ± 19,12 %	Aguas residuales domésticas	Das et al., 2020
25	MFC con ánodo de velo de carbono	0,55 W/m ³	84,60 %	Aguas residuales de cocina	Ajit et al., 2023
255	MFC de monocámara	318 mW/m ³	41 ± 16 %	Aguas residuales municipales	Hiegemann et al., 2019

4.3. Humedales construidos

Una tecnología innovadora dentro del estudio de las MFC son los humedales artificiales que aplican las características intrínsecas de las plantas, el suelo y microorganismos para el tratamiento de aguas residuales imitando a las condiciones naturales de un humedal para eliminar los contaminantes (Kumar *et al.*, 2023). La aplicación de MFC en los humedales construidos permite producir energía bioeléctrica y eliminar contaminantes a la vez, debido a que la estimulación eléctrica aumenta la actividad microbiana y facilita la eliminación de los contaminantes (Xu *et al.*, 2023). Inclusive se ha demostrado que los sistemas de humedales construidos con MFC son capaces de eliminar eficazmente sustancias complejas como microplásticos y metales pesados de las aguas residuales (Kumar *et al.*, 2022; Yuan *et al.*, 2023). No obstante, este sistema presenta algunas limitaciones, como la incertidumbre del voltaje y potencia eléctrica generada por las MFC que se ve influenciada por el tipo de microorganismos, sustrato y condiciones ambientales (Dai *et al.*, 2022).

Conclusión

Las MFC representan una prometedora solución para la generación sostenible de energía y la gestión de residuos. Para alcanzar un equilibrio entre simplicidad y eficiencia, se han desarrollado multicámaras que suelen ofrecer mejores

resultados, gracias a factores clave como los materiales de electrodos, la composición de membrana y las condiciones operativas. Aunque el grafeno ha demostrado mejorar el rendimiento, se exploran alternativas más económicas como el carbono. Además, la ingeniería genética, como en *Shewanella oneidensis*, potencia la eficiencia de las MFC al ampliar sustratos y flujo de electrones, aprovechando la capacidad exoelectrogénica de microorganismos de distintos dominios y su cooperación. Se destaca también el potencial de las MFC en el tratamiento de grandes volúmenes de aguas residuales y la eliminación de contaminantes, que se convierte en una solución prometedora para el tratamiento de aguas residuales y la generación de energía sostenible a gran escala.

Contribución de los autores

Maricielo Vera realizó la esquematización del trabajo, la introducción, la metodología, los resultados y discusiones, la elaboración de imágenes ilustrativas, el resumen y las revisiones respectivas de todos los artículos. Mayra Pisconte realizó la redacción de introducción, la elaboración de esquema de metodología, los resultados, las discusiones, la conclusión y el resumen. Alexia Seminario realizó la redacción de metodología, los resultados, las discusiones y las revisiones respectivas de todos los artículos. Gustavo Quique realizó la redacción de introducción, los resultados y las discusiones.

Referencias bibliográficas

- Ajit, K., Anand, V. D., Niharika, R. M., Harikrishna, B., Kumar, Y. A. y Krishnan, H. (2023). «Scaling up of MFC technology using cost effective electrodes for treatment of kitchen wastewater». *Materials Today: Proceedings*, en prensa. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.09.132>
- Algar, C. K., Howard, A., Ward, C. y Wanger, G. (2020). «Sediment microbial fuel cells as a barrier to sulfide accumulation and their potential for sediment remediation beneath aquaculture pens». *Scientific reports*, 10(1), 13087. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70002-4>
- Almatouq, A., Ahmed, M. E., Khajah, M., Abdullah, H., Al-Yaseen, R., Al-Jumaa, M., ... y Shishter, A. (2023). «Performance of tubular microbial fuel cells using different industrial wastewater». *Journal of Water Process Engineering*, 55, 104166. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104166>
- Antonopoulou, G., Bampos, G., Ntaikou, I., Alexandropoulou, M., Dailianis, S., Bebelis, S. y Lyberatos, G. (2023). «The biochemical and electrochemical characteristics of a microbial fuel cell used to produce electricity from olive mill wastewater». *Energy*, 282, 128804. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128804>
- Arkin, A., Li, Z. y Zhou, X. (2023). «Enhanced power generation with disordered porous carbon-modified foam iron-nickel anode in human urine-driven microbial fuel cell». *Electrochimica Acta*, 472, 143378. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2023.143378>
- Bora, A., Mohanasu, K., Swetha, T. A., Ananthi, V., Sindhu, R., Chi, N. T. L., ... y Mathimani, T. (2022). «Microbial electrolysis cell (MEC): Reactor configurations, recent advances and strategies in biohydrogen production». *Fuel*, 328, 125269. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125269>
- Chen, Y., Zhao, F., Pu, Y., Lin, X., Yin, H. y Tang, X. (2023). «Nano-Fe₃O₄ coated on carbon monolith for anode enhancement in microbial fuel cells». *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(2), 109608. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109608>
- Choi, D., Lee, S. B., Kim, S., Min, B., Choi, I. G. y Chang, I. S. (2014). «Metabolically engineered glucose-utilizing *Shewanella* strains under anaerobic conditions». *Bioresource Technology*, 154, pp. 59-66. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.12.025>
- Dai, M., Wu, Y., Wang, J., Lv, Z., Li, F., Zhang, Y. y Kong, Q. (2022). «Constructed wetland-microbial fuel cells enhanced with iron carbon fillers for ciprofloxacin wastewater treatment and power generation». *Chemosphere*, 305, 135377. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135377>
- Das, I., Ghangrekar, M. M., Satyakam, R., Srivastava, P., Khan, S. y Pandey, H. N. (2020). «On-site sanitary wastewater treatment system using 720-L stacked microbial fuel cell: case study». *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 24(3), 04020025. Disponible en: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HZ.2153-5515.0000518](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000518)
- Devi, M., Vomero, M., Fuhrer, E., Castagnola, E., Gueli, C., Nimbalkar, S., ... y Sharma, S. (2021). «Carbon-based neural electrodes: Promises and challenges». *Journal of Neural Engineering*, 18(4), 041007. Disponible en: <https://doi.org/10.1088/1741-2552/ac1e45>
- Din, M. I., Iqbal, M., Hussain, Z. y Khalid, R. (2020). «Bioelectricity generation from waste potatoes using single chambered microbial fuel cell». *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 1-11. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1797944>
- Dong, Y., Qu, Y., He, W., Du, Y., Liu, J., Han, X. y Feng, Y. (2015). «A 90-liter stackable baffled microbial fuel cell for brewery wastewater treatment based on energy self-sufficient mode». *Bioresource Technology*, 195, pp. 66-72. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.06.026>
- Elhenawy, S., Khraisheh, M., AlMomani, F., Al-Ghouti, M. y Hassan, M. K. (2022). «From waste to watts: Updates on key applications of microbial fuel cells in wastewater treatment and energy production». *Sustainability*, 14(2), 955. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/su14020955>
- Estrada-Arriaga, E. B., Hernández-Romano, J., García-Sánchez, L., Garcés, R. A. G., Bahena-Bahena, E. O., Guadarrama-Pérez, O. y Chavez, G. E. M. (2018). «Domestic wastewater treatment and power generation in continuous flow air-cathode stacked microbial fuel cell: Effect of series and parallel configuration». *Journal of Environmental Management*, 214, pp. 232-241. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.03.007>
- Ge, Z. y He, Z. (2016). «Long-term performance of a 200 liter modularized microbial fuel cell system treating municipal wastewater: treatment, energy, and cost». *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2(2), pp. 274-281. Disponible en: <https://doi.org/10.1039/C6EW00020G>
- Guadarrama-Pérez, O., Guevara-Pérez, A. C., Guadarrama-Pérez, V. H., Bustos-Terrones, V., Hernández-Romano, J., Guillén-Garcés, R. A. y Moeller-Chávez, G. E. (2023). «Bioelectricity production from the anodic inoculation of *Geobacter sulfurreducens* DL-1 bacteria in constructed wetlands-microbial fuel cells». *Bioelectrochemistry*, 154, 108537. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2023.108537>
- Gul, H., Raza, W., Lee, J., Azam, M., Ashraf, M. y Kim, K. H. (2021). «Progress in microbial fuel cell technology for wastewater treatment and energy harvesting». *Chemosphere*, 281, 130828. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130828>
- Halim, M. A., Rahman, M. O., Eti, I. A., Shefa, N. R., Ibrahim, M. y Alam, M. J. (2020). «Electricity generation in different cell connections with optimized anodic materials in microbial fuel cells». *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 1-13. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1851818>
- Hiegemann, H., Littfinski, T., Krimmler, S., Lübken, M., Klein, D., Schmelz, K. G., ... y Wichern, M. (2019). «Performance and inorganic fouling of a submersible 255 L prototype microbial fuel cell module during continuous long-term operation with real municipal wastewater under practical conditions». *Bioresource Technology*, 294, 122227. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122227>
- Hoang, A., Nižetić, S., Ng, K., Papadopoulos, A., Le, A., Kumar, S. y Hadiyanto, H. (2022). «Microbial fuel cells for bioelectricity production from waste as sustainable prospect of future energy sector». *Chemosphere*, 287, 132285. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132285>
- Islam, A. K., Dunlop, P. S., Bhattacharya, G., Mokim, M., Hewitt, N. J., Huang, Y., ... y Brandoni, C. (2023). «Comparative performance of sustainable anode materials in microbial fuel cells (MFCs) for electricity generation from wastewater». *Results in Engineering*, 20, 101385. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101385>
- Jamal, M. T., Pugazhendhi, A. y Jeyakumar, R. B. (2020). «Application of halophiles in air cathode MFC for seafood industrial wastewater treatment and energy production under high saline condition». *Environmental Technology & Innovation*, 20, 101119. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101119>
- Kang, Y. L., Pichiah, S. y Ibrahim, S. (2017). «Facile reconstruction of microbial fuel cell (MFC) anode with enhanced exoelectrogens selection for intensified electricity generation». *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(3), pp. 1661-1671. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.09.059>

- Karuppiah, T., Uthirakrishnan, U., Sivakumar, S. V., Authilingam, S., Arun, J., Sivaramakrishnan, R. y Pugazhendhi, A. (2022).** «Processing of electroplating industry wastewater through dual chambered microbial fuel cells (MFC) for simultaneous treatment of wastewater and green fuel production». *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(88), pp. 37569-37576. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.06.034>
- Kuleshova, T. E., Gall', N. R., Galushko, A. S. y Panova, G. G. (2021).** «Electrogenesis in plant-microbial fuel cells in parallel and series connections». *Technical Physics*, 66, pp. 496-504. Disponible en: <https://doi.org/10.1134/S1063784221030142>
- Kumar, V. K., Manangath, S. P. y Gajalakshmi, S. (2023).** «Innovative pilot-scale constructed wetland-microbial fuel cell system for enhanced wastewater treatment and bioelectricity production». *Chemical Engineering Journal*, 460, 141686. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.141686>
- Kumar, V., Dwivedi, S. K. y Oh, S. (2022).** «A review on microbial-integrated techniques as promising cleaner option for removal of chromium, cadmium and lead from industrial wastewater». *Journal of Water Process Engineering*, 47, 102727. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102727>
- Kurniawan, T. A., Othman, M. H. D., Liang, X., Ayub, M., Goh, H. H., Kusworo, T. D., ... & Chew, K. W. (2022).** «Microbial Fuel Cells (MFC): A Potential Game-Changer in Renewable Energy Development». *Sustainability*, 14(24), 16847. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/su142416847>
- Li, F., Li, Y., Sun, L., Li, X., Yin, C., An, X., ... y Song, H. (2017).** «Engineering *Shewanella oneidensis* enables xylose-fed microbial fuel cell». *Biotechnology for Biofuels*, 10, pp. 1-10. Disponible en: <https://doi.org/10.1186/s13068-017-0881-2>
- Li, H., Zhang, S., Yang, X. L., Yang, Y. L., Xu, H., Li, X. N. y Song, H. L. (2019).** «Enhanced degradation of bisphenol A and ibuprofen by an up-flow microbial fuel cell-coupled constructed wetland and analysis of bacterial community structure». *Chemosphere*, 217, pp. 599-608. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.11.022>
- Liang, X., Li, H., Dou, J., Wang, Q., He, W., Wang, C., ... y Zhang, Y. (2020).** «Stable and biocompatible carbon nanotube ink mediated by silk protein for printed electronics». *Advanced Materials*, 32(31), 2000165. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/adma.202000165>
- Liu, D., Xu, C., Li, C., Fang, W., Yan, M. y Tang, H. (2023).** «In-situ constructed metallic Mo decorated MoS₂ nanosheets on carbon cloth as excellent anode for efficient current generation and Cr (VI) removal». *Journal of Cleaner Production*, 428, 139534. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139534>
- Logan, B., Rossi, R., Ragab, A. y Saikaly, P. (2019).** «Electroactive microorganisms in bioelectrochemical systems». *Nature Reviews Microbiology*, 17(5), pp. 307-319. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41579-019-0173-x>
- Mahajan, P. y Panwar, P. (2022).** «Perspective and future scope of nanotechnology in modification of microbial fuel cell». *Materials Today: Proceedings*, 71, pp. 179-185. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.08.369>
- Malvankar, N. S., Lau, J., Nevin, K. P., Franks, A. E., Tuominen, M. T. y Lovley, D. R. (2012).** «Electrical conductivity in a mixed-species biofilm». *Applied and Environmental Microbiology*, 78(16), pp. 5967-5971. Disponible en: <https://doi.org/10.1128/AEM.01803-12>
- Mohan, S. V., Sravan, J. S., Butti, S. K., Krishna, K. V., Modestra, J. A., Velvizhi, G., ... y Pandey, A. (2019).** «Microbial electrochemical technology: emerging and sustainable platform». En *Microbial Electrochemical Echnology* (pp. 3-18). Elsevier. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64052-9.00001-7>
- Moqsud, M. A. y Okamoto, T. (2023).** «Bioelectricity generation from corn plant microbial fuel cell (PMFC) using natural bamboo charcoal as electrodes and *Shewanella oneidensis*». *Bioresource Technology Reports*, 24, 101611. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101611>
- Munoz-Cupa, C., Hu, Y., Xu, C. y Bassi, A. (2021).** «An overview of microbial fuel cell usage in wastewater treatment, resource recovery and energy production». *Science of the Total Environment*, 754, 142429. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142429>
- Narayanasamy, S. y Jayaprakash, J. (2021).** «Carbon cloth/nickel cobaltite (NiCo₂O₄)/polyaniline (PANI) composite electrodes: Preparation, characterization, and application in microbial fuel cells». *Fuel*, 301, 121016. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121016>
- Nguyen, D. A., Pham, N. y Pham, H. T. (2021).** «Wastewater treatment performance and microbial community of anode electrodes of membrane and membrane-less MFCs under effect of sunlight». *Journal of Water Process Engineering*, 42, 102159. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102159>
- Nolasco-Benitez, E. y Gomis-Bellmunt, O. (2021).** «Acceso a la electricidad y desarrollo rural». *CienciAmérica*, 10(3), pp. 57-72. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.33210/ca.v10i3.371>
- Obileke, K., Onyeaka, H., Meyer, E. L. y Nwokolo, N. (2021).** «Microbial fuel cells, a renewable energy technology for bio-electricity generation: A mini-review». *Electrochemistry Communications*, 125, 107003. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2021.107003>
- Okabe, S. (2022).** «High electrical energy harvesting performance of an integrated microbial fuel cell and low voltage booster-rectifier system treating domestic wastewater». *Bioresource Technology*, 359, 127455. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127455>
- Palanisamy, G., Jung, H. Y., Sadhasivam, T., Kurkuri, M. D., Kim, S. C. y Roh, S. H. (2019).** «A comprehensive review on microbial fuel cell technologies: Processes, utilization, and advanced developments in electrodes and membranes». *Journal of Cleaner Production*, 221, pp. 598-621. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.172>
- Prathiba, S., Kumar, P. S. y Vo, D. V. N. (2022).** «Recent advancements in microbial fuel cells: A review on its electron transfer mechanisms, microbial community, types of substrates and design for bio-electrochemical treatment». *Chemosphere*, 286, 131856. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131856>
- Raychaudhuri, A. y Behera, M. (2022).** «Effect of operating parameters on rice mill wastewater treatment in an acidogenic chamber and MFC coupled system». *Bioresource Technology Reports*, 20, 101249. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101249>
- Sánchez, M., Fernández, L. y Espinoza-Montero, P. (2021).** «Generación de energía eléctrica y tratamiento de aguas residuales mediante celdas de combustible microbianas». *Revista Digital Novasinergia*, 4(1), pp. 164-180. <https://doi.org/10.37135/ns.01.07.10>
- Savla, N., Pandit, S., Mathuriya, A. S., Gupta, P. K., Khanna, N., Babu, R. P. y Kumar, S. (2021).** «Recent advances in bioelectricity generation through the simultaneous valorization of lignocellulosic biomass and wastewater treatment in microbial fuel cell». *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 48, 101572. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101572>
- Selvasembian, R., Mal, J., Rani, R., Sinha, R., Aghari, R., Joshua, I., ... y Pradhan, N. (2022).** «Recent progress in microbial fuel cells for industrial effluent treatment and energy generation: Fundamentals to scale-up application and challenges». *Bioresource Technology*, 346, 126462. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126462>



- Shabani, M., Younesi, H., Pontié, M., Rahimpour, A., Rahimnejad, M. y Zinatizadeh, A. A. (2020).** «A critical review on recent proton exchange membranes applied in microbial fuel cells for renewable energy recovery». *Journal of Cleaner Production*, 264, 121446. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121446>
- Shen, J., Du, Z., Li, J. y Cheng, F. (2020).** «Co-metabolism for enhanced phenol degradation and bioelectricity generation in microbial fuel cell». *Bioelectrochemistry*, 134, 107527. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2020.107527>
- Singh, H. M., Pathak, A. K., Chopra, K., Tyagi, V. V., Anand, S. y Kothari, R. (2019).** Microbial fuel cells: a sustainable solution for bioelectricity generation and wastewater treatment». *Biofuels*, 10(1), pp. 11-31. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/17597269.2017.1413860>
- Toczyłowska-Mamińska, R., Szymona, K. y Kloch, M. (2018).** «Bioelectricity production from wood hydrothermal-treatment wastewater: enhanced power generation in MFC-fed mixed wastewaters». *Science of The Total Environment*, 634, pp. 586-594. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.002>
- Venegas Venegas, J. A., Raj Aryal, D. y Pinto Ruiz, R. (2019).** «Biogás, la energía renovable para el desarrollo de granjas porcícolas en el estado de Chiapas». *Análisis Económico*, 34(85), pp. 169-187. Disponible en: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2448-66552019000100169
- Walker, D. J., Adhikari, R. Y., Holmes, D. E., Ward, J. E., Woodard, T. L., Nevin, K. P. y Lovley, D. R. (2018).** «Electrically conductive pili from pilin genes of phylogenetically diverse microorganisms». *The ISME Journal*, 12(1), pp. 48-58. <https://doi.org/10.1038/ismej.2017.141>
- Wang, H., Qi, X., Chen, S. y Wang, X. (2022).** «The efficient treatment of breeding wastewater by an electroactive microbial community in microbial fuel cell». *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(2), 107187. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107187>
- Wilberforce, T., Abdelkareem, M. A., Elsaid, K., Olabi, A. G. y Sayed, E. T. (2022).** «Role of carbon-based nanomaterials in improving the performance of microbial fuel cells». *Energy*, 240, 122478. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122478>
- Xu, W., Yang, B., Wang, H., Zhang, L., Dong, J. y Liu, C. (2023).** «Simultaneous removal of antibiotics and nitrogen by microbial fuel cell-constructed wetlands: Microbial response and carbon-nitrogen metabolism pathways». *Science of The Total Environment*, 164855. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164855>
- Yang, J., Cao, X., Sun, Y., Yang, G. y Yi, W. (2022).** «Recovery of microbial fuel cells with high COD molasses wastewater and analysis of the microbial community». *Biomass and Bioenergy*, 161, 106450. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106450>
- Yaqoob, A. A., Ibrahim, M. N. M. y Rodríguez-Couto, S. (2020).** «Development and modification of materials to build cost-effective anodes for microbial fuel cells (MFCs): An overview». *Biochemical Engineering Journal*, 164, 107779. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.bej.2020.107779>
- Yuan, Y., Leng, C., Zhou, Y., Yuan, Y., Niu, Y., Xu, R., ... y Wang, H. (2023).** «Impact of separate concentrations of polyethylene microplastics on the ability of pollutants removal during the operation of constructed wetland-microbial fuel cell». *Journal of Environmental Management*, 341, 118107. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118107>
- Zhuang, L., Ma, J., Yu, Z., Wang, Y. y Tang, J. (2018).** «Magnetite accelerates syntrophic acetate oxidation in methanogenic systems with high ammonia concentrations». *Microbial Biotechnology*, 11(4), pp. 710-720. Disponible en: <https://doi.org/10.1111/1751-7915.13286>
- Koffi, N. y Okabe, S. (2022).** «High electrical energy harvesting performance of an integrated microbial fuel cell and low voltage booster-rectifier system treating domestic wastewater». *Bioresource Technology*, 359, 127455. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127455>