

Producción de bioenergía a partir de lodo residual en celdas microbianas combustibles

Bioenergy production from residual sludge in microbial fuel cells

Produção de bioenergia a partir de lamas de depuração em células de combustível microbianas

Recibido: 28/03/2025 | Revisado: 06/04/2025 | Aceptado: 06/04/2025 | Publicado: 08/04/2025

Andrea Pantusin

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0997-244X>

Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí “Manuel Félix López”. Ingeniería Ambiental, Ecuador

E-mail: andrea.pantusin@espam.edu.ec

Milena Patiño

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-4471-1304>

Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí “Manuel Félix López”. Ingeniería Ambiental, Ecuador

E-mail: milena.patino@espam.edu.ec

Carlos Banchón

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0388-1988>

Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí “Manuel Félix López”. Ingeniería Ambiental, Ecuador

E-mail: carlos.banchon@espam.edu.ec

Resumen

La gestión inadecuada de lodos residuales en lagunas de oxidación genera acumulación de materia orgánica y contaminantes, planteando un reto ambiental. Las celdas microbianas de combustible (CMCs) ofrecen una solución innovadora para producir bioenergía y tratar aguas residuales. La presente revisión sistemática tiene como objetivo evaluar el efecto de la producción de bioenergía a partir de lodo residual mediante celdas microbianas combustibles, a través de un análisis descriptivo de la literatura científica existente. Los resultados indican que las CMCs de una cámara logran hasta 2400 mW/m², superando a las de doble y triple cámara debido a menor resistencia interna. El pretratamiento alcalino y la fermentación del lodo incrementan el voltaje hasta 0,89 V con electrodos de grafito modificados. La relación C/N y una conductividad eléctrica superior a 1700 µS/cm mejoran la estabilidad y eficiencia energética, especialmente en lodos ricos en materia orgánica. Estos hallazgos demuestran que las CMCs son una alternativa sostenible para gestionar lodos residuales, reduciendo el impacto ambiental y optimizando la eficiencia energética en el tratamiento de aguas residuales.

Palabras clave: Bioenergía; Bioelectricidad; Voltaje; Lagunas de oxidación; Gestión ambiental.

Abstract

Inadequate sludge management in oxidation ponds leads to the accumulation of organic matter and pollutants, posing an environmental challenge. Microbial fuel cells (MFCs) offer an innovative solution for bioenergy production and wastewater treatment. This systematic review aims to evaluate the effect of bioenergy production from residual sludge using MFCs through a descriptive analysis of existing scientific literature. The results indicate that single-chamber MFCs achieve up to 2400 mW/m², surpassing double- and triple-chamber systems due to lower internal resistance. Alkaline pretreatment and sludge fermentation increase voltage up to 0.89 V with modified graphite electrodes. A C/N ratio and electrical conductivity above 1700 µS/cm enhance stability and energy efficiency, especially in sludge rich in organic matter. These findings demonstrate that MFCs are a sustainable alternative for residual sludge management, reducing environmental impact and optimizing energy efficiency in wastewater treatment.

Keywords: Bioenergy; Bioelectricity; Voltage; Oxidation ponds; Environmental management.

Resumo

A gestão inadequada de lodos residuais em lagoas de oxidação provoca o acúmulo de matéria orgânica e poluentes, representando um desafio ambiental. As células a combustível microbianas (CCMs) oferecem uma solução inovadora para a produção de bioenergia e o tratamento de águas residuais. Esta revisão sistemática tem como objetivo avaliar o efeito da produção de bioenergia a partir de lodo residual por meio de CCMs, por meio de uma análise descritiva da literatura científica existente. Os resultados indicam que as CCMs de câmara única alcançam até 2400 mW/m², superando as de câmara dupla e tripla devido à menor resistência interna. O pré-tratamento alcalino e a fermentação do lodo aumentam a voltagem até 0,89 V com eletrodos de grafite modificados. A relação C/N e uma condutividade elétrica superior a 1700 µS/cm melhoram a estabilidade e a eficiência energética, especialmente em lodos ricos em matéria orgânica. Esses achados demonstram que as CCMs são uma alternativa sustentável para a gestão de lodos residuais, reduzindo o impacto ambiental e otimizando a eficiência energética no tratamento de águas residuais.

Palavras-chave: Bioenergia; Bioeletricidade; Tensão; Lagoas de oxidação; Gestão ambiental.

1. Introducción

La gestión inadecuada de las aguas y lodos residuales representa uno de los principales retos ambientales a nivel global. En 2020, el 44% de las aguas residuales generadas mundialmente fueron liberadas al medio ambiente sin recibir tratamiento adecuado (Programa de Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos [ONU-Hábitat] y Organización Mundial de la Salud [OMS], 2021). Este manejo deficiente contribuye al transporte de contaminantes microbianos y tóxicos, como metales pesados y microorganismos peligrosos (Dhara & Fayshal, 2024; Gama et al., 2024). Así mismo, cada año se estima que entre 600 y 700 toneladas de lodos sólidos no son gestionadas adecuadamente, agravando los impactos ambientales y sanitarios (Hossain et al., 2022). Como resultado, en 2022, 1,700 millones de personas consumieron agua contaminada con heces, y aproximadamente 7,600 niños menores de 5 años fallecieron por enfermedades diarreicas asociadas al consumo de agua insalubre (OMS, 2023).

Las plantas de tratamiento de aguas residuales, incluidas las lagunas de oxidación, si bien son una herramienta valiosa para reducir la contaminación, presentan importantes limitaciones. Estas instalaciones generan emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) significativas, siendo las plantas anaerobias las más emisoras, con un 54.19% del total (Cristancho et al., 2019). A esto se suman los problemas sociales asociados a los malos olores y el alto consumo energético necesario para su operación, que oscila entre 0.5 y 2 kWh/m³ de agua tratada (Argota y Iannacone, 2020; Torres et al., 2020). Paradójicamente, las aguas residuales contienen hasta diez veces más energía de la necesaria para tratarlas, lo que subraya la necesidad de tecnologías sostenibles y eficientes (Kumar et al., 2019).

En este contexto, las celdas microbianas combustibles (CMCs) emergen como una solución prometedora. Estas tecnologías no solo permiten el tratamiento de aguas residuales mediante la reducción de la carga orgánica, sino que también generan bioenergía al aprovechar las bacterias electrogénicas presentes en el lodo residual (Álvarez et al., 2019; Castro et al., 2024). Su capacidad para operar a temperatura ambiente y con menores emisiones de CO₂ en comparación con los combustibles fósiles las convierte en una alternativa sostenible (Roy et al., 2023). Los microorganismos de los lodos residuales transforman la energía química en energía eléctrica mediante la transferencia de electrones hacia un electrodo o ánodo, lo que optimiza el rendimiento energético (Shirkosh et al., 2022).

Dada la relevancia de las CMCs en la producción de energía limpia y la mejora del tratamiento de lodos y aguas residuales, la presente revisión sistemática tiene como objetivo evaluar el efecto de la producción de bioenergía a partir de lodo residual mediante celdas microbianas combustibles, a través de un análisis descriptivo de la literatura científica existente. La presente revisión busca contribuir al avance de tecnologías sostenibles en la ingeniería ambiental y su aplicación en sistemas de tratamiento de aguas y lodos residuales.

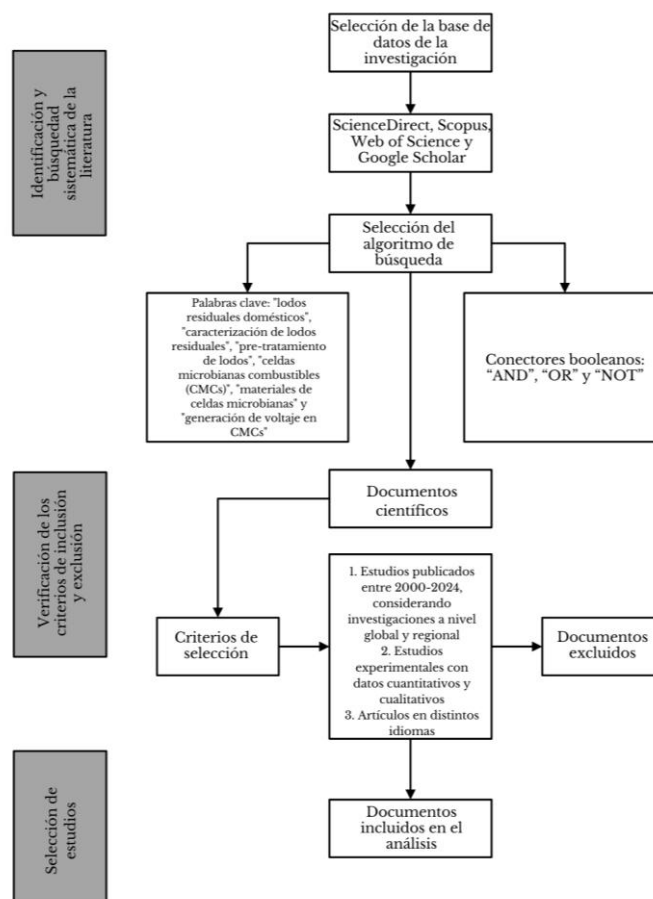
2. Metodología

Esta investigación utiliza un enfoque cuantitativo en lo experimental (Pereira et al., 2018), analizando estudios previos sobre la eficiencia de las CMC a través de una revisión sistemática (Gomes & Caminha, 2014) en ScienceDirect, Scopus, Web of Science y Google Scholar. Se seleccionaron estudios experimentales (2000-2024) con datos cuantitativos sobre rendimiento eléctrico y cualitativos sobre diseño, excluyendo trabajos teóricos, tesis y experimentos menores. La búsqueda empleó palabras clave en español e inglés como "lodos residuales", "caracterización de lodos", "pretratamiento", "CMCs", "materiales" y "voltaje", combinadas con operadores booleanos (AND, OR, NOT).

La Figura 1 describe los pasos de la investigación: Fase 1, búsqueda sistemática en bases de datos con palabras clave y booleanos, obteniendo 100 artículos; Fase 2, verificación de criterios de inclusión (estudios experimentales 2000-2025 con datos cuantitativos/cualitativos) y exclusión; Fase 3, selección final, descartando no relevantes e integrando los pertinentes al

análisis. La calidad de los estudios fue evaluada según rigor metodológico, relevancia y replicabilidad. Tras aplicar criterios de inclusión y exclusión, se seleccionaron hasta 60 artículos de bases de datos reconocidas. Para identificar patrones de influencia y autores clave, se utilizó Connected Papers, permitiendo visualizar conexiones y tendencias emergentes en la literatura.

Figura 1 - Metodología aplicada a la investigación.



Fuente: Datos de esta investigación (2025).

3. Resultados y discusión

3.1 Caracterización de lodos

La caracterización de lodos residuales es crucial para evaluar riesgos sanitarios y optimizar su tratamiento, evitando la contaminación de suelos y aguas (Nakayama et al., 2025; Réveillé et al., 2003). La Tabla 1 compara estudios (2000-2023) sobre parámetros clave.

El pH promedio de los lodos, según 9 fuentes, fue 7,21, dentro de rangos normativos ambientales, con un mínimo de 5,78 (China), donde la acidez favorece putrefacción y vectores, y un máximo de 7,97 (Marruecos), aceptable y útil para reducir olores y estabilizar contaminantes (Saldaña & Castillo, 2022). La conductividad eléctrica (CE) promedió 1844,04 $\mu\text{S}/\text{cm}$, también dentro de límites permisibles, con valores de 681 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Australia) a 4200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (España); una CE baja afecta negativamente la eficiencia de celdas microbianas combustibles (CMCs) al dificultar el flujo eléctrico entre bacterias y electrodos (El-naggar et al., 2024), mientras un valor alto puede complicar descargas según el contexto.

La materia orgánica promedió 54,55%, con un mínimo de 31,8% (Túnez) y un máximo de 67,3% (España); aunque su alta presencia genera riesgos ambientales por patógenos, es valiosa para mejorar la operatividad de CMCs (González y

Villalobos, 2021). La relación C/N tuvo un promedio de 9,78, oscilando entre 0,989 (Australia) y 28,3 (Francia), sin límites normativos claros, pero es un indicador crítico para el metabolismo microbiano y la calidad del lodo (Gutiérrez et al., 2024). La relación entre carbono y nitrógeno son indispensables para el desarrollo y el metabolismo microbiano. La disponibilidad de C y N minimiza o elimina la necesidad de sustratos adicionales para aumentar la transferencia de electrones, así como en los procesos de nitrificación-desnitrificación (Thakur et al., 2025).

Tabla 1 - Propiedades fisicoquímicas del lodo residual entre diferentes países.

País	pH	CE (µS/cm)	Materia orgánica (%)	Carbono (%)	Nitrógeno (%)	C/N	Referencia
Marruecos	7,97	1727,2	65,08	14,9	3,65	4,105	Achkir et al. (2023)
Francia	7,2	-	-	36,75	1,3	28,3	Jouraiphy et al. (2005)
Portugal	7,8	-	54	23	3,6	6,4	Pedra et al. (2007)
Australia	7,3	681	-	17,8	18	0,989	Smernik et al. (2003)
India	7,4	-	-	26,71	2,37	11,4	Suthar (2010)
China	5,78	-	-	33,45	5,66	5,91	Kong et al. (2019)
Túnez	7,7	1702	31,8	18,5	1,18	15,7	Zoghalmi et al. (2020)
Sudáfrica	6,90	910	-	-	-	-	Badza et al. (2020)
España	6,8	4200	67,3	35,4	6,59	5,4	Paredes et al. (2000)

Fuente: Datos de esta investigación (2025).

3.2 Caracterización de aguas residuales

La Tabla 2 muestra las características fisicoquímicas de las aguas residuales en diversos países, incluyendo pH, CE, carbono, nitrógeno, DQO, DBO y SST. En una revisión de ocho fuentes, el pH promedio fue 7,87, dentro del rango ambiental para efluentes (6-9, OMS, 2006), con valores de 7,1 en China y 9,04 en Tailandia, lo que indica que no representan un peligro ambiental. La conductividad eléctrica (CE) promedio fue de 1527,54 µS/cm, con un mínimo de 338,63 µS/cm en Tailandia y un máximo de 2990 µS/cm en Irak. Según la FAO (2012), algunos países establecen un límite de 2000 µS/cm para descargas, aunque las normativas ambientales sugieren un rango de 500 a 3000 µS/cm para evitar impactos negativos en cuerpos de agua receptores y ecosistemas. Dado que los valores registrados están dentro de estos límites, no representan un riesgo ambiental inmediato.

La DQO presentó un promedio de 431,09 mg/L, con una concentración mínima de 17,8 mg/L en Dinamarca y una máxima de 1072 mg/L en el Reino Unido. Los datos obtenidos de la revisión bibliográfica se encuentran dentro de los límites

establecidos por diversas investigaciones y la normativa ambiental, que estipula que la concentración de DQO en las descargas de efluentes debe ser inferior a 1500 mg/L (Mongioví et al., 2024).

Por otro lado, la DBO mostró una concentración promedio de 45,17 mg/L, con su valor más bajo registrado en Tailandia (15,33 mg/L) y el más alto en Austria (75 mg/L). Cabe destacar que estos son los únicos datos disponibles en las fuentes consultadas. Asimismo, los valores obtenidos están dentro del rango aceptable (<500 mg/L) según lo indicado por la normativa (Mongioví et al., 2024). En contraste, ciertos países de América establecen las cifras máximas de vertidos al alcantarillado en cuanto a la DQO es de 900 mg/L, mientras que para la DBO es de 350 mg/L (FAO, 2012).

Por último, los sólidos suspendidos totales mostraron la cifra más baja en Tailandia con una concentración de 29,33 mg/L, y la cifra más alta en Suecia con un valor de 398 mg/L. Los datos promedios se obtuvieron en torno a 178,33 mg/L; indicando que no existe un riesgo por SST ya que la normativa indica que los límites legales de descargas deben encontrarse por debajo de 500 mg/L, lo cual se cumple (Mongioví et al., 2024).

Las propiedades fisicoquímicas de lodos y aguas residuales, como pH, CE, carbono y nitrógeno, son cruciales para optimizar el tratamiento y rendimiento de las celdas microbianas combustibles (CMCs), usando residuos como fuente de energía. El pH, generalmente neutro en lodos y aguas, es clave; Ojha y Pradhan (2025) destacan que un pH neutro mejora los procesos microbianos y el funcionamiento de los electrodos, influenciados significativamente por variaciones electroquímicas (60 mV/pH en el ánodo y 68 mV/pH en el cátodo), afectando directamente la eficiencia energética de las CMCs.

Tabla 2 - Propiedades fisicoquímicas del agua residual entre diferentes países.

País	pH	CE (µS/cm)	Carbono (%)	Nitrógeno (%)	DQO (mg/L)	DBO (mg/L)	SST (mg/L)	Referencia
Austria	-	-	-	-	251	75	95	Vobruba et al. (2025)
Tailandia	9,04	338,63	-	-	128	15,33	29,33	Nyein y Boonthai (2025)
China	7,10	-	-	-	416	-	-	Shu et al. (2015)
Reino Unido	7,66	1254	0,0842	0,007	1072	-	-	Serrano et al. (2024)
China	-	-	-	-	276,8	-	191	Du et al. (2025)
Suecia	-	-	0,0186	-	856	-	398	Khalid et al. (2024)
Irak	7,68	2990	-	-	-	-	-	Abbass et al. (2024)
Dinamarca	-	-	0,0007	0,0008	17,8	-	-	Peer et al. (2025)

Fuente: Datos de esta investigación (2025).

La información recolectada sobre las características fisicoquímicas del lodo y el agua residual son esenciales para mejorar el rendimiento de las CMCs; entre los más importantes se encuentran el pH y la CE. Según Ojha y Pradhan (2025), es fundamental contar con un valor neutro para optimizar los procesos microbianos y el funcionamiento de los electrodos en las

CMCs, ya que las características electroquímicas de estos son influenciadas de manera significativa por el pH.

Además, de acuerdo con Thakur et al. (2025), la CE es otro factor esencial para la mejora del rendimiento de una CMC y la transmisión efectiva de electrones al ánodo; ya que los microorganismos presentes en el cátodo o ánodo descomponen los compuestos orgánicos presentes en el agua o lodo residual, produciendo electrones que deben transportarse al ánodo. La CE en el medio acuoso facilita esta transferencia, permitiendo que los electrones fluyan eficientemente hacia el ánodo (Banchón et al., 2019).

3.3 Procesos de pretratamiento / Preparación previa a la celda

El pretratamiento en sistemas de CMCs es crucial para reducir la carga contaminante, evitar obstrucciones y optimizar el tratamiento de aguas residuales. Incluye la eliminación de sólidos, grasas y aceites, mejorando la eficiencia y vida útil del sistema. Además, optimiza el consumo energético, favoreciendo una gestión más sostenible y económica (Mitraka et al., 2022; Neumann et al., 2016).

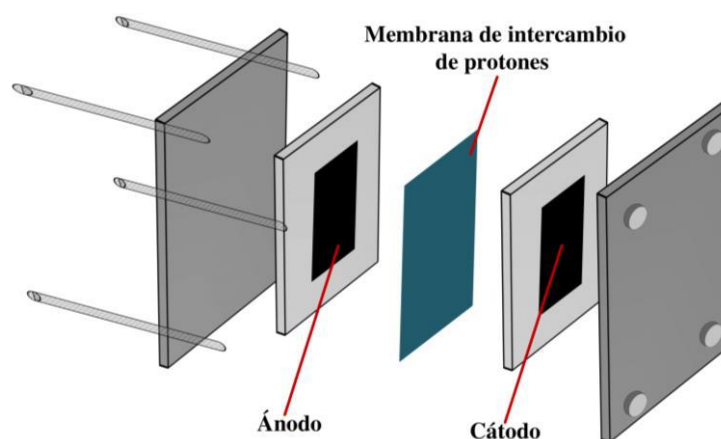
3.4 Co-digestión

La co-digestión, que implica la digestión conjunta de múltiples sustratos, mejora la producción de metano y la eficiencia del proceso mediante efectos sinérgicos (Azarmanesh et al., 2023). Frente a la mono-digestión, ofrece mejor suministro de nutrientes, dilución de tóxicos y reducción de gases de efecto invernadero. Sin embargo, una selección inadecuada del co-sustrato puede afectar el equilibrio químico y microbiológico, reduciendo la eficiencia y producción de biogás (Thakur et al., 2023).

3.5 Celdas microbianas combustibles

Una CMC se compone principalmente de un ánodo, un cátodo y, en algunos casos, membranas que actúan como separadores entre estos componentes (Jalili et al., 2024).

Figura 2 - Componentes básicos de la celda microbiana combustible.



Fuente: Logan (2008).

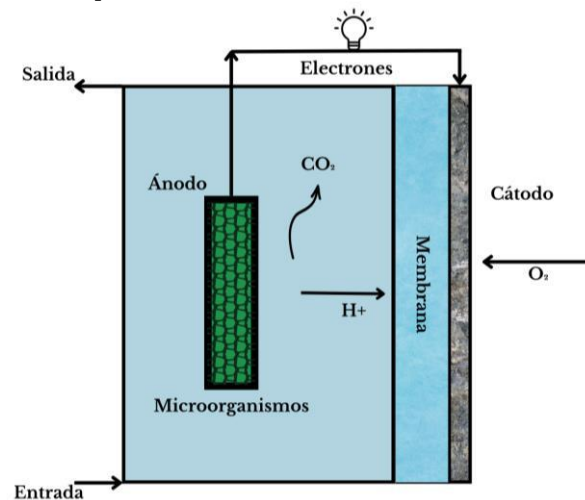
De acuerdo con Kumar et al. (2017), una celda única puede configurarse con una o dos cámaras, adoptando distintas estructuras, como diseños planos, rectangulares, cilíndricos o en forma de U, entre otros.

3.5.1 CMCs de una sola cámara

El diseño de una celda de combustible microbiana incluye una cámara anódica anaeróbica con un electrodo conductor donde microorganismos degradan compuestos de aguas residuales, generando H^+ , e^- y CO_2 para producir energía (Feng et al., 2008; Roy et al., 2023). Una membrana y un cátodo poroso facilitan la transferencia de protones y optimizan la eficiencia (Nawaz et al., 2022). Las celdas de una sola cámara son más económicas, tienen menor resistencia interna y mayor potencia de salida (Tanikkul & Pisutpaisal, 2015). Sin embargo, su tamaño limitado reduce la densidad de potencia al aumentar la escala (Muñoz et al., 2021).

La Figura 3 muestra cómo funciona una CMC de una sola cámara con membrana, destacando sus componentes y su funcionamiento. A la izquierda, la entrada permite el ingreso del sustrato orgánico, que es procesado por microorganismos electrogénicos en el ánodo. Estos microorganismos oxidan la materia orgánica, liberando electrones (e^-) y protones (H^+). Los electrones viajan por un circuito externo, representado por una línea con una bombilla encendida, hacia el cátodo, mientras que los protones atraviesan la membrana en el centro. En el cátodo, los electrones y protones se combinan con oxígeno (O_2). La salida indica la expulsión de los productos generados (Roy et al., 2023).

Figura 3 - Esquema de los componentes básicos de una celda microbiana combustible de una cámara.

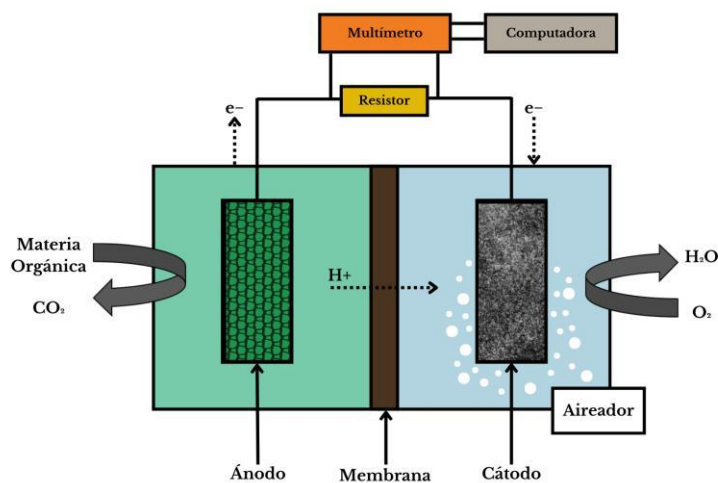


Fuente: Roy et al. (2023).

3.5.2 CMCs de doble cámara

En la Figura 4, se presenta el esquema de los componentes fundamentales de una CMC de dos cámaras. Las cámaras anódica y catódica están separadas por una membrana. En el ánodo, las bacterias descomponen la materia orgánica, liberando electrones hacia el ánodo y protones hacia la solución circundante. El cátodo se expone al aire para facilitar las reacciones entre electrones y protones. Un cable conductor (junto con una carga) cierra el circuito, generando energía. El sistema incluye una resistencia que actúa como carga para la energía producida, y la corriente se determina mediante la medición de la caída de voltaje a través de la resistencia, utilizando un multímetro conectado a un sistema de adquisición de datos (Logan 2008).

Figura 4 - Esquema de los componentes básicos de una celda microbiana combustible de doble cámara.

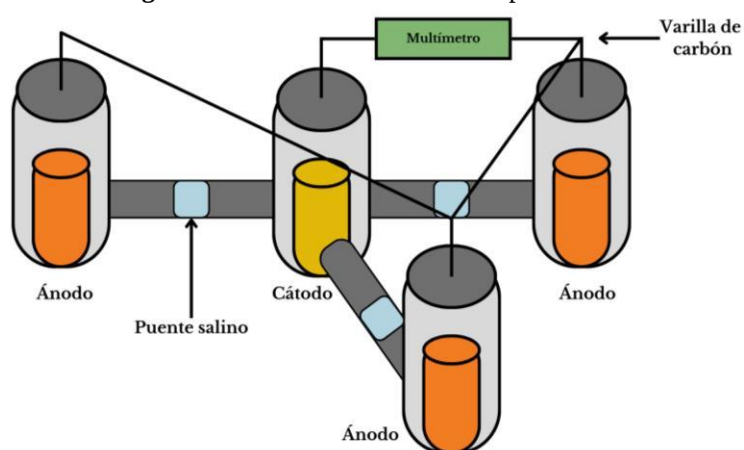


Fuente: Logan (2008).

3.5.3 CMCs de triple cámara

Esta estructura consta de dos o más cámaras anódicas dispuestas en ambos extremos de la cámara catódica. La Figura 5 representa una CMC de triple cámara, donde tres cámaras anódicas están interconectadas con una cámara catódica central mediante puentes salinos, permitiendo el intercambio iónico sin mezclar los electrolitos (Naha et al., 2023). En las cámaras anódicas, los microorganismos oxidan el sustrato, liberando electrones que viajan a través de un circuito externo hasta el cátodo, donde se produce la reducción del aceptor final, generando electricidad (Bhaduri & Behera, 2024). Además, las varillas de carbono actúan como electrodos, y un multímetro mide el voltaje generado en el sistema.

Figura 5. Diseño de una CMC de triple cámara.



Fuente: Naha et al. (2023).

El tipo de sustrato y sus componentes influyen directamente en la eficiencia de las CMCs, ya que afectan la producción de energía, el crecimiento microbiano y la actividad metabólica (Thakur et al., 2025). La Tabla 3 presenta distintas configuraciones de CMCs, comparando los materiales utilizados en el ánodo y el cátodo, el tipo de membrana empleada y la densidad de potencia alcanzada en cada caso.

Las CMCs de una sola cámara presentan un mejor rendimiento en términos de densidad de potencia en comparación con las de doble y triple cámara. En particular, la configuración con fibras de grafito y un catalizador Fe-N-C derivado de

hidrogel de Fe(III)-quitosano logró la mayor densidad de potencia, alcanzando 2400 mW/m² (Yang et al., 2020). Este resultado sugiere que la combinación de materiales avanzados y la utilización de una capa de difusión de membrana de PVDF hidrofóbica favorece la eficiencia del sistema. Otra CMC de una sola cámara, con fibra nanométrica de polianilina y tejido de carbono, obtuvo una densidad de potencia de 1091 mW/m² (Ahmed & Kim, 2024).

En contraste, las CMCs de doble cámara han alcanzado una eficiencia de hasta 1790 mW/m² al emplear fibras de grafito como ánodo y fieltro de grafito recubierto de platino como cátodo, separados por una membrana de cerámica. Sin embargo, se han registrado menores densidades de potencia en otros sistemas, como 320 mW/m² con ánodos de platino y cátodos de acero inoxidable separados por una membrana de Nafion, 247,1 mW/m² al utilizar espuma de níquel modificada con plasma de nitrógeno y 132 mW/m² en configuraciones que incorporan papel CNT/quitosano/carbono como ánodo (Bergel et al., 2005; Daud et al., 2018; Gholami et al., 2024; Liu et al., 2014).

Por otro lado, la CMCs de triple cámara mostró un rendimiento de 420 mW/m² utilizando un sistema con paños de carbono rectangulares como ánodo y cátodo junto a membranas de intercambio aniónico y catiónico, mientras que otro diseño con doble ánodo y membrana N-117 Nafion registró una densidad de potencia de 168 mW/m² (Samsudeen et al., 2014; Yang et al., 2021).

Tabla 3 - Tipos de configuraciones de CMCs y componentes empleados.

Tipo de CMCs	Materiales para el ánodo	Materiales para el cátodo	Membrana	Densidad de potencia (mW/m ²)	Referencia
CMCs de una cámara	Fibra nanométrica de polianilina (PANInf), Tejido de carbono tipo A.	Tejido de carbono tipo B, Platino (Pt) depositado sobre carbón Vulcan XC-72 (carga de 0.3 mg/cm ²)	Sin membrana	1091	Ahmed y Kim (2024)
CMCs de una cámara	Fibras de grafito	Catalizador de Fe–N–C derivado del hidrogel de Fe(III)-quitosano	Capa de difusión de membrana de PVDF hidrofóbica	2400	Yang et al. (2020)
CMCs de doble cámara	Fibras de grafito	Fieltro de grafito recubierto de platino	Membrana de cerámica	1790	Daud et al. (2018)
CMCs de doble cámara	Espuma de níquel modificada con plasma de nitrógeno	Espuma de níquel	Membrana de intercambio protónico	247,1	Gholami et al. (2024)
CMCs de doble cámara	Ánodos de platino	Acero inoxidable	Membrana de Nafion	320	Bergel et al. (2005)
CMCs de doble cámara	Papel CNT/quitosano/carbono	Tela de carbono	Polímero politetrafluoretileno	132	Liu et al. (2014)
CMCs de triple cámara	Paños de carbono rectangulares	Paños de carbono rectangulares	Membrana de intercambio aniónico y membrana intercambio catiónico	420	Yang et al. (2021)
CMCs de triple cámara	Doble ánodo con placa de grafito	Placa de grafito	Membrana N-117 Nafion	168	Samsudeen et al. (2014)

Fuente: Datos de esta investigación (2025).

La eficiencia de las CMCs está influenciada por la resistencia interna, derivada de la separación de compartimentos y el uso de membranas, siendo las cerámicas una alternativa más asequible y eficiente frente al Nafion, cuyo alto costo limita su implementación. Así, superar esta resistencia interna se presenta como una barrera tecnológica clave a resolver (Bazrgar & Mousavi, 2016; Daud et al., 2018; Vidhyeswari et al., 2022). En este sentido, la incorporación de una tercera cámara en las CMCs aumenta la resistencia interna, lo que reduce el voltaje y la eficiencia del sistema, como indican estudios previos que muestran que mayor concentración de catolito en sistemas de triple cámara disminuye significativamente la producción de energía, subrayando la importancia de evaluar cuidadosamente el diseño estructural para optimizar el rendimiento (Wang et al., 2020).

3.6 Generación de voltaje

La generación de voltaje en las CMCs varía según el sustrato y las condiciones de tratamiento, como se muestra en la Tabla 4, que presenta estudios sobre la eficiencia de sistemas utilizando lodo residual en distintos países. La generación de energía en celdas microbianas de combustible (CMC) a partir de lodo residual presenta variaciones significativas según el país y las condiciones de tratamiento aplicadas. El voltaje generado oscila entre 0,40 V y 0,89 V, con el valor más bajo registrado en Turquía en un sistema de CMCs de doble cámara con electrodos de grafito y titanio (Ayol et al., 2021) y el más alto en Pakistán en un sistema de CMCs de doble cámara fabricado en acrílico (Rashid et al., 2013).

En cuanto al amperaje, solo se encuentra reportado un valor de 0,801 mA en el estudio realizado en Turquía (Ayol et al., 2021), lo que dificulta determinar un rango o promedio representativo, ya que otros estudios no incluyen datos sobre amperaje. Esto puede deberse a que los investigadores enfocan sus mediciones en la densidad de potencia, sin detallar la corriente o voltaje, lo que limita la comparación y obtención de una referencia más amplia.

La densidad de potencia muestra una mayor variabilidad, con valores que van desde 51 mW/m² hasta 2500 mW/m². El menor valor fue registrado en China en un sistema combinado de CMCs y biorreactor de membrana (Su et al., 2013), mientras que la mayor densidad de potencia se reporta en Hungría en un sistema de CMCs de dos cámaras con electrodos de fibra de carbono (Bélafi et al., 2011). El promedio de densidad de potencia en los estudios revisados es de aproximadamente 990,87 mW/m².

Tabla 4 - Generación de voltaje en CMCs utilizando lodo residual.

País	Voltaje generado (V)	Amperaje generado (mA)	Densidad de potencia (mW/m ²)	Condiciones de tratamiento	Referencia
China	0,63	-	1295	Fermentación de lodos primarios y secundarios (es decir, lodos mixtos) bajo el uso combinado de surfactante y condición de pH alcalino	Zheng et al. (2017)
Hungría	0,6	-	2500	Sistema de CMCs de dos cámaras con electrodos de fibra de carbono.	Bélafi et al. (2011)
Corea del Sur	0,62	-	13,59	Sistema de CMCs de doble cámara con pretratamiento de lodos (ultrasónico vs. combinación de calor/álcali)	Oh et al. (2014)
Turquía	0,4	0,801	312,98	CMCs de doble cámara equipado con electrodos de grafito y titanio	Ayol et al. (2021)
Indonesia	0,69	-	1174,42	Biorreactor de membrana rectangular de doble cámara utilizando un sistema de CMCs	Utami et al. (2024)

China	0,74	-	650	Pretratamiento alcalino in situ de lodos activados residuales utilizando CMCs de doble cámara	Geng et al. (2021)
Pakistán	0,89	-	1780	CMCs de doble cámara fabricados en acrílico	Rashid et al. (2013)
China	0,43	-	51	Sistema combinado de CMCs y biorreactor de membrana	Su et al. 2013
Egipto	0,50		456,8	CMCs de una sola cámara sin membrana	Ahmed et al. (2016)
China	0,62	-	100,52	Sistema acoplado CMCs-lodo residual con Cr (VI) como aceptor de electrones	Gu et al. (2024)

Fuente: Datos de esta investigación (2025).

La Tabla 5 muestra una comparación de la generación de voltaje en sistemas de CMCs utilizados en el tratamiento de aguas residuales en diferentes países. El voltaje generado en las celdas microbianas de combustible (CMC) varía entre 0,224 V y 0,74 V. El voltaje promedio de los sistemas analizados es de aproximadamente 0,58 V. El valor más bajo se observa en Etiopía (0,224 V) en un sistema con ánodo de grafito modificado, mientras que el valor más alto se alcanza en China (0,74 V) con un sistema modularizado de CMCs de 1000 L (Ali et al., 2015; Liang et al., 2018).

El amperaje generado en las CMCs oscila entre 0,38 mA y 0,86 mA. El valor más bajo se registra en Irak (0,38 mA) en un sistema sin membrana utilizando perlas acrílicas, y el valor más alto se presenta en Estados Unidos (0,86 mA) en un tratamiento combinado de CMCs y un biorreactor de membrana de lecho fluidizado anaeróbico (Ismail et al., 2015; Ren et al., 2014).

La densidad de potencia de las CMCs varía considerablemente, con valores que oscilan entre 9,2 mW/m² y 1266,7 mW/m². Teniendo un promedio de 394,4 mW/m². El valor más bajo se encuentra en México (9,2 mW/m²) con un sistema de CMCs con cátodo de platino/carbono, mientras que el valor más alto se observa en China (1266,7 mW/m²) con un sistema equipado con el ánodo microalgas y piritita (Ali et al., 2015; Tang et al., 2021).

Tabla 5 - Generación de voltaje para agua residual entre diferentes países.

País	Voltaje generado (V)	Amperaje generado (mA)	Densidad de potencia (mW/m ²)	Condiciones de tratamiento	Referencia
Irak	0, 61	0,38	21,9	Sistema de CMCs sin membrana utilizando perlas acrílicas para separar los compartimentos anódicos y catódico	Ismail et al. (2015)
Corea del Sur	0,56	-	121,68	Sistema de CMCs de cátodo flotante de aire (FA-CMC)	Yoo et al. (2011)
Etiopía	0,224	0,735	820,02	CMCs con ánodo de grafito modificado de un compuesto α -MnO ₂ encapsulado con PANI	Dessie et al. (2022)
China	0,657	-	1266,7	CMCs equipada con el ánodo microalgas y piritita	Tang et al. (2021)
Estados Unidos	0,58	0,86	89	Tratamiento combinado de CMCs y un biorreactor de membrana de lecho fluidizado anaeróbico	Ren et al. 2014
China	0.74	-	420	Sistema CMCs modularizado de 1000 L	Liang et al. (2018)

México	0,207	-	9,2	CMCs con cátodo de platino/carbono	Ali et al. (2015)
España	0,23	-	25	CMCs de doble cámara con ánodo de cilindro de grafito y cátodo con grafito poroso	Rodrigo et al. (2007)
China	0,58	-	62,93	CMCs de doble cámara asistida por biopelícula de algas	Yang et al. (2018)
Italia	0,38	-	124,6	CMCs de una sola cámara con cátodo de aire y ánodo de platino	Sciarria et al. (2013)

Fuente: Datos de esta investigación (2025).

El voltaje promedio observado en los estudios analizados para el lodo residual fue de aproximadamente 0,61 V, mientras que para el agua residual fue de 0,48 V. Estos valores son considerablemente inferiores a los de las baterías comerciales, como las pilas AA alcalinas (1,5 V), y las baterías de flujo Zinc-Bromo (1,83 V) y Vanadio (1,26 V) (Lema et al., 2023; Valdez et al., 2022). El valor máximo registrado fue de 2500 mW/m² con el uso de lodo residual. Este valor está dentro del rango comparable con las baterías comerciales de zinc-aire, que alcanzan densidades de potencia entre 2000–3000 mW/m² (Gao et al., 2022). Aunque las CMCs presentan una ventaja en sostenibilidad, su voltaje limitado las hace menos eficientes para aplicaciones que requieren mayor potencia; sin embargo, en condiciones óptimas, pueden generar densidades de potencia competitivas con algunas baterías comerciales.

4. Conclusiones

Los resultados de esta revisión muestran que las CMCs de una cámara alcanzan densidades de potencia de hasta 2400 mW/m², superando a las de doble y triple cámara, que enfrentan mayor resistencia interna. El pretratamiento alcalino y la fermentación del lodo elevan el voltaje hasta 0,89 V con electrodos de grafito modificados. Factores como la relación C/N y una conductividad eléctrica superior a 1700 µS/cm optimizan la estabilidad y eficiencia energética en lodos ricos en materia orgánica. Estos hallazgos posicionan a las CMCs como una solución sostenible para convertir lodos residuales en energía limpia. Sin embargo, persisten limitaciones: la mayoría de los estudios son a escala de laboratorio, sin validación industrial. La variabilidad del lodo y el costo de electrodos y membranas podrían dificultar su viabilidad económica. Se sugiere realizar investigaciones a mayor escala, desarrollar materiales con mayor conductividad eléctrica e integrar las CMCs con otras tecnologías de tratamiento de aguas residuales para mejorar su eficiencia y escalabilidad, potenciando su uso en la gestión sostenible de residuos domésticos.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la ESPAM-MFL por su invaluable respaldo en la realización de este trabajo.

References

- Abbass, R., Amooey, A. & AlJaberi, F. (2024). Electrocoagulation removal of COD and TDS from real municipal wastewater sourced from the Euphrates River using multipole arrangement. *Results in Chemistry*, 9. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2024.101613>
- Achkir, A., Aouragh, A., El Mahi, M., Lofti, E., Labjar, N., El Bouch, M., Ouahidi, M., Badza, T., Farhane, H., & El Moussaoui, T. (2023). Implication of sewage sludge increased application rates on soil fertility and heavy metals contamination risk. *Emerging Contaminants*, 9(1). <https://doi.org/10.1016/j.emcon.2022.100200>
- Ahmed, J. & Kim, S. (2024). Polyaniline nanofiber: an excellent anode material for microbial fuel cells. *RSC Advances*, 14, 34498–34503. <https://doi.org/10.1039/D4RA03774J>

- Ahmed, S., Rozaik, E., & Abdel-Halim, H. (2016). Performance of Single-Chamber Microbial Fuel Cells Using Different Carbohydrate-Rich Wastewaters and Different Inocula. *Polish Journal of Environmental Studies*, 25(2), 503-510. <https://doi.org/10.15244/pjoes/61115>
- Ali, A. E.-H., Gomaa, O. M., Fathey, R., Abd El Kareem, H. & Abou Zaid, M. M. (2015). Optimización de una celda de combustible microbiana de doble cámara para el tratamiento de aguas residuales domésticas y la producción de electricidad. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 43(9), 1092–1099. [https://doi.org/10.1016/S1872-5813\(15\)30032-3](https://doi.org/10.1016/S1872-5813(15)30032-3)
- Álvarez, L., García, R., Ulloa, R., Arellano, M. & González, A. (2019). Potencial biotecnológico para la valorización de residuos generados en granjas porcinas y cultivos de trigo. *Entreciencias: diálogos en la sociedad del conocimiento*, 7(21), 1-21. <https://doi.org/10.22201/enesl.20078064e.2019.21.70799>
- Argota, G. & Iannacone, J. (2020). Sistema de tratamiento mineral pasivo ante el costo ambiental sostenible estimado en la laguna de oxidación Angostura Limón, Ica, Perú. *Biotiempo*, 17(1), 79-90. <https://doi.org/10.31381/biotempo.v17i1.2998>
- Ayol, A., Biryol, I., Taşkan, E., & Hasar, H. (2021). Enhanced sludge stabilization coupled with microbial fuel cells (MFCs). *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(57), 29529-29540. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.10.143>
- Azarmanesh, R., Zarghami, M., Hasani, M., Ghiasinejad, H., & Zhang, Y. (2023). Anaerobic co-digestion of sewage sludge with other organic wastes: A comprehensive review focusing on selection criteria, operational conditions, and microbiology. *Chemical Engineering Journal Advances*, 14, 100453. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.100453>
- Badza, T., Tesfamariam, E., & Cogger, C. (2020). Agricultural use suitability assessment and characterization of municipal liquid sludge: Based on South Africa survey. *Science of The Total Environment*, 721, 137658. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137658>
- Banchón, C., Peralta, C., Borodulina, T., Aguirre-Munizaga, M. & Vera-Lucio, N. (2019). On-Line Monitoring of Bioelectricity from a Microbial Fuel Cell Using Fishery-Industry Wastewater. *ICT for Agriculture and Environment. CITAMA2019. Advances in Intelligent Systems and Computing*, 41–48.
- Bazrgar, M., & Mousavi, S. (2016). Effect of casting solvent on the characteristics of Nafion/TiO₂ nanocomposite membranes for microbial fuel cell application. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(1), 476-482. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.11.036>
- Bélafi, K., Vajda, B. & Nemestóthy, N. (2011). Study on operation of a microbial fuel cell using mesophilic anaerobic sludge. *Desalination and Water Treatment*, 35(3), 222–226. <https://doi.org/10.5004/dwt.2011.2415>
- Bergel, A., Féron, D., & Mollica, A. (2005). Catalysis of oxygen reduction in PEM fuel cell by seawater biofilm. *Electrochemistry Communications*, 7(9), 900-904. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2005.06.006>
- Bhaduri, S., & Behera, M. (2024). From single-chamber to multi-anodic microbial fuel cells: A review. *Journal of Environmental Management*, 355, 120465. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120465>
- Castro, J., Uribe, L. & Fuentes-Schweizer, P. (2024). Electroactive microorganisms in coffee processing wastewater (iron redox processes). *UNED Research Journal*, 16(1), e4806. <https://doi.org/10.22458/urj.v16i1.4806>
- Cristancho, D., Gámez, W., Guerra, J. & Dueñas, M. (2019). Estimación de los gases efecto invernadero generados por las plantas de tratamiento de aguas residuales ubicadas en la cuenca del río Bogotá. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 18(34), 25-44. <https://doi.org/10.22395/rium.v18n34a2>
- Daud, S., Wan, W., Kim, B., Somalu, M., Bakar, M., Muchtar, A., Jahim, J., Lim, S., & Chang, I. (2018). Comparison of performance and ionic concentration gradient of two-chamber microbial fuel cell using ceramic membrane (CM) and cation exchange membrane (CEM) as separators. *Electrochimica Acta*, 259, 365-376. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.10.118>
- Dessie, Y., Tadesse, S., & Adimasu, Y. (2022). Improving the performance of graphite anode in a Microbial Fuel Cell via PANI encapsulated α -MnO₂ composite modification for efficient power generation and methyl red removal. *Chemical Engineering Journal Advances*, 10, 100283. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.100283>
- Dhara, F. & Fayshal, A. (2024). Waste Sludge: Entirely Waste or a Sustainable Source of Biocrude? A Review. *Appl Biochem Biotechnol*. <https://doi.org/10.1007/s12010-023-04846-7>
- Du, R., Ando, K., Liu, R., Deng, L., Wang, W., & Li, Y.-Y. (2025). CO₂ removal from biogas improved stable treatment of low-alkalinity municipal wastewater using anaerobic membrane bioreactor. *Bioresour Technol*, 416. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.131821>
- El-naggar, A., Alsulaymani, L., Bakr, M., Alsaleh, A., Kamal, A., Albassam, A., Aldhafiri, A., & Lakshminarayana, G. (2024). Influence of nature melanin on the structural, linear/nonlinear optical properties and electrical conduction mechanism of PVA/CMC/PPy blended polymers for optoelectronic applications. *Results in Physics*, 64, 107924. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2024.107924>
- Feng, Y., Wang, X., Logan, B., & Lee, H. (2008). Brewery wastewater treatment using air-cathode microbial fuel cells. *Appl Microbiol Biotechnol*, 78(5), 873–880. <https://doi.org/10.1007/s00253-008-1360-2>
- Gama, M., Dantas, A., Sanches, A. & Alvas, F. (2024). Evaluating centrifuged water treatment plant sludge as an adsorbent for nutrients, microorganisms, and heavy metals removal from wastewater. *Journal of Cleaner Production*, 468. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142975>
- Gao, Y., Pan, Z., Sun, J., Liu, Z., & Wang, J. (2022). High-Energy Batteries: Beyond Lithium-Ion and Their Long Road to Commercialisation. *Nano-Micro Lett*, 14(94). <https://doi.org/10.1007/s40820-022-00844-2>
- Geng, Y.-K., Yuan, L., Liu, T., Li, Z.-H., Zheng, X., & Sheng, G.-P. (2021). In-situ alkaline pretreatment of waste activated sludge in microbial fuel cell enhanced power production. *Journal of Power Sources*, 491, 229616. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.229616>

- Gholami-Kermanshahi, M., Lee, M.-C., Lange, G. & Chang, S.-H. (2024). Effects of N₂ plasma modification on the surface properties and electrochemical performance of Ni foam electrodes for double-chamber microbial fuel cells. *Materials Advances*, 5, 5554–5560. <https://doi.org/10.1039/d4ma00153b>
- Gomes, I. S. & Caminha, I. O. (2014). Guia para estudos de revisão sistemática: uma opção metodológica para as Ciências do Movimento Humano. *Movimento*, 20(1), 395-411. <https://doi.org/10.22456/1982-8918.41542>
- González-Jiménez, Y., & Villalobos-Morales, J. (2021). Manejo ambiental de residuos orgánicos: Estado del arte de la generación de compostaje a partir de residuos sólidos provenientes de sistemas de trampas de grasa y aceite. *Revista Tecnología En Marcha*, 34(2), 11–22. <https://doi.org/10.18845/tm.v34i2.4843>
- Gu, W., Wang, Y., Hu, X., & Deng, F. (2024). MFC-residual sludge coupled treatment for simulated chromium(VI) wastewater: Electricity production performance and microbial communities. *Journal of Water Process Engineering*, 67, 106097. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106097>
- Gutiérrez-González, L., Ojeda-Barrios, D., Ávila-Quezada, G., & Hernández-Rodríguez, A. (2024). Características cambiantes durante el compostaje y valores indicativos de calidad en el producto final. *Chilean Journal of Agricultural & Animal Sciences*, 40(2), 467-484. <https://revistas.udec.cl/index.php/chjaas/article/view/12336>
- Henze, M., van Loosdrecht, M. C. M., & Ekama, G. A. (Eds.). (2008). *Biological Wastewater Treatment*. IWA Publishing. <https://doi.org/10.2166/9781780401867>
- Hossain, R., Khalekuzzaman, M., Kabir, S., Islam, B. & Bari, H. (2022). Enhancing fecal sludge derived biocrude quality and productivity using peat biomass through co-hydrothermal liquefaction. *Journal of Cleaner Production*, 355. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130371>
- Ismail, Z. & Jaeeel, A. (2015). Performance of continuous flowing membrane-less microbial fuel cell with a new application of acrylic beads separator. *Desalination and Water Treatment*, 54(2), 412-421. <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.885396>
- Jalili, P., Ala, A., Nazari, P., Jalili, B., & Ganji, D. (2024). A comprehensive review of microbial fuel cells considering materials, methods, structures, and microorganisms. *Heliyon*, 10(3), e25439. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25439>
- Jouraihy, A., Amir, S., El Gharous, M., Revel, J.-C., & Hafidi, M. (2005). Chemical and spectroscopic analysis of organic matter transformation during composting of sewage sludge and green plant waste. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 56(2), 101-108. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2005.06.002>
- Khalid, O., Gidstedt, S., Lipnizki, F., & Rudolph-Schöpping, G. (2024). Direct Membrane Filtration (DMF) of municipal wastewater – A study on the prevention and remediation of fouling. *Journal of Water Process Engineering*, 67. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106235>
- Kong, L., Liu, J., Han, Q., Zhou, Q., & He, J. (2019). Integrating metabolomics and physiological analysis to investigate the toxicological mechanisms of sewage sludge-derived biochars to wheat. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 185. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109664>
- Kumar, R., Singh, L., & Zularisam, A. (2017). Microbial Fuel Cells: Types and Applications. *Waste Biomass Management – A Holistic Approach*, 367-384. https://doi.org/10.1007/978-3-319-49595-8_16
- Kumar, S., Kumar, V., Malyan, S., Mathimani, T., Maskarenj, M., Ghosh, P. & Pugazhendhi, A. (2019). Microbial fuel cells (MFCs) for bioelectrochemical treatment of different wastewater streams. *Fuel*, 254. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.05.109>
- Lema, P., Remache, M., Saltos, E., & García, J. (2023). Eficiencia de las baterías convencionales en comparación con las baterías de flujo y el impacto ambiental en el Ecuador. *Revista De Investigación Talentos*, 10(2), 16-28. <https://doi.org/10.33789/talentos.10.2.187>
- Liang, P., Duan, R., Jiang, Y., Zhang, X., Qiu, Y., & Huang, X. (2018). One-year operation of 1000-L modularized microbial fuel cell for municipal wastewater treatment. *Water Research*, 141, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.04.066>
- Liu, X.-W., Huang, Y.-X., Sun, X.-F., Sheng, G.-P., Zhao, F., Wang, S.-G. & Yu, H.-Q. (2014). Conductive carbon nanotube hydrogel as a bioanode for enhanced microbial electrocatalysis. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 6(11), 8158–8164. <https://doi.org/10.1021/am500624k>
- Logan, B. E. (2008). *Microbial Fuel Cells*. Wiley.
- Mitraka, G.-C., Kontogiannopoulos, K., Batsioulas, M., Baniyas, G., Zouboulis, A., & Kougias, P. (2022). A Comprehensive Review on Pretreatment Methods for Enhanced Biogas Production from Sewage Sludge. *Energies*, 15(18), 6536. <https://doi.org/10.3390/en15186536>
- Mongioví, C., Morin, N., Lacalamita, D., & Crini, G. (2024). Impact of carbon technology on chemical and biochemical oxygen demand values as water quality indicators of physico-chemical treated laundry effluents. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 10, 101012. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.101012>
- Moretti, A., Lynn, H., & Skvaril, J. (2024). A review of the state-of-the-art wastewater quality characterization and measurement technologies. Is the shift to real-time monitoring nowadays feasible? *Journal of Water Process Engineering*, 60. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105061>
- Muñoz-Cupa, C., Hu, Y., Xu, C., & 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. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142429>
- Naha, A., Debroy, R., Sharma, D., Shah, M., & Nath, S. (2023). Microbial fuel cell: A state-of-the-art and revolutionizing technology for efficient energy recovery. *Cleaner and Circular Bioeconomy*, 5, 100050. <https://doi.org/10.1016/j.clcb.2023.100050>
- Nakayama, G., Dantas, M., & Alves, F. (2025). Beneficial use of sludge from water treatment plants as a multiple resource: Potential and limitations. *Resources, Conservation & Recycling Advances*, 25. <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2025.200247>
- Nawaz, A., Haq, I., Qaisar, K., Gunes, B., Raja, S., Mohyuddin, K., & Amin, H. (2022). Microbial fuel cells: Insight into simultaneous wastewater treatment and bioelectricity generation. *Process Safety and Environmental Protection*, 161, 357-373. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.03.039>

- Neumann, P., Pesante, S., Venegas, M., & Vidal, G. (2016). Developments in pre-treatment methods to improve anaerobic digestion of sewage sludge. *Rev Environ Sci Biotechnol*, 15, 173–211. <https://doi.org/10.1007/s11157-016-9396-8>
- Nyein, N. & Iwai, C. B. (2025). Using Azolla microphylla in investigating different agro-wastewaters treatment and its biomass growth for carbon sequestration. *Results in Engineering*, 25. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103865>
- Oh, S-E., Yoon, J., Gurung, A., & Kim, D-J. (2014). Evaluation of electricity generation from ultrasonic and heat/alkaline pretreatment of different sludge types using microbial fuel cells. *Bioresource Technology*, 165, 21-26. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.03.018>
- Ojha, R., & Pradhan, D. (2025). The potential of microbial fuel cell for converting waste to energy: An overview. *Sustainable Chemistry for the Environment*, 9, 100196. <https://doi.org/10.1016/j.senv.2024.100196>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2012). *Norma ambiental sobre control de descargas a aguas superficiales, alcantarillado sanitario y aguas costeras*. <https://faolex.fao.org/docs/pdf/dom218334.pdf>
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2006). *A compendium of standards for wastewater reuse in the Eastern Mediterranean Region*. IRIS Home. <https://iris.who.int/handle/10665/116515>
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2023). *Agua para consumo humano*. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>
- Paredes, C., Roig, A., Bernal, M., Sánchez-Monedero, M., & Cegarra, J. (2000). Evolution of organic matter and nitrogen during co-composting of olive mill wastewater with solid organic wastes. *Biol Fertil Soils*, 32, 222–227. <https://doi.org/10.1007/s003740000239>
- Pedra, F., Polo, A., Ribeiro, A., & Domingues, H. (2007). Effects of municipal solid waste compost and sewage sludge on mineralization of soil organic matter. *Soil Biology and Biochemistry*, 39(6), 1375-1382. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2006.12.014>
- Peer, S., Vybornova, A., Saracevic, Z., Krampe, J. & Zoboli, O. (2025). Source-tracing of industrial and municipal wastewater effluent in river water via fluorescence fingerprinting. *Science of the Total Environment*, 959, 178187. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.178187>
- Pereira, A. S., Shitsuka, D. M., Parreira, F. J., & Shitsuka, R. (2018). *Metodologia da pesquisa científica*. [free e-book]. Santa Maria/RS. Ed. UAB/NTE/UFSM. <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/15824>
- Programa de Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos (ONU-Hábitat) y Organización Mundial de la Salud (OMS). (2021). *Progress on wastewater treatment – Global status and acceleration needs for SDG indicator 6.3.1*. https://unhabitat.org/sites/default/files/2021/08/sdg6_indicator_report_631_progress_on_wastewater_treatment_2021_english_pages.pdf
- Rashid, N., Cui, Y-F., Rehman, M., & Han, J-I. (2013). Enhanced electricity generation by using algae biomass and activated sludge in microbial fuel cell. *Science of The Total Environment*, 456–457, 91-94. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.03.067>
- Ren, L., Ahn, Y., & Logan, B. (2014). A Two-Stage Microbial Fuel Cell and Anaerobic Fluidized Bed Membrane Bioreactor (MFC-AFMBR) System for Effective Domestic Wastewater Treatment. *Environmental Science & Technology*, 48(7), 3601-4216. <https://doi.org/10.1021/es500737m>
- Réveillé, V., Mansuy, L., Jardé, E., & Garnier-Sillam, E. (2003). Characterisation of sewage sludge-derived organic matter: lipids and humic acids. *Organic Geochemistry*, 34(4), 615-627. [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(02\)00216-4](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(02)00216-4)
- Rodrigo, M., Cañizares, P., Lobato, J., Paz, R., Sáez, C., & Linares, J. (2007). Production of electricity from the treatment of urban waste water using a microbial fuel cell. *Journal of Power Sources*, 169(1), 198-204. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.01.054>
- Roy, H., Ur Rahman, T., Tasnim, N., Arju, J., Rafid, M., Islam, R., Pervez, N., Cai, Y., Naddeo, V. & Islam, S. (2023). Microbial Fuel Cell Construction Features and Application for Sustainable Wastewater Treatment. *Membranes*, 13(5), 490. <https://doi.org/10.3390/membranes13050490>
- Samsudeen, N., Radhakrishnan, T., & Matheswaran, M. (2014). Performance comparison of triple and dual chamber microbial fuel cell using distillery wastewater as a substrate. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 34(2), 589-594. <https://doi.org/10.1002/ep.12005>
- Sciarria, T., Tenca, A., D’Epifanio, A., Mecheri, B., Merlino, G., Barbato, M., Borin, S., Licoccia, S., Garavaglia, V., & Adani, F. (2013). Using olive mill wastewater to improve performance in producing electricity from domestic wastewater by using single-chamber microbial fuel cell. *Bioresource Technology*, 147, 246-253. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.08.033>
- Serrano-Blanco, S., Zan, R., Harvey, A., & Velasquez-Orta, S. (2024). Intensified microalgae production and development of microbial communities on suspended carriers and municipal wastewater. *Journal of Environmental Management*, 370. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122717>
- Shirkosh, M., Hojjat, Y., & Mardanpour, M. (2022). Boosting microfluidic microbial fuel cells performance via investigating electron transfer mechanisms, metal-based electrodes, and magnetic field effect. *Scientific Reports*, 12, 7417. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-11472-6>
- Shu, D., He, Y., Yue, H., & Wang, Q. (2015). Microbial structures and community functions of anaerobic sludge in six full-scale wastewater treatment plants as revealed by 454 high-throughput pyrosequencing. *Bioresource Technology*, 186, 163-172. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.03.072>
- Smernik, R., Oliver, I., & Merrington, G. (2003). Characterization of Sewage Sludge Organic Matter Using Solid-State Carbon-13 Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy. *Journal of Environment Quality*, 32(4), 1516-1522. <https://doi.org/10.2134/jeq2003.1516>
- Su, X., Tian, Y., Sun, Z., Lu, Y., & Li, Z. (2013). Performance of a combined system of microbial fuel cell and membrane bioreactor: Wastewater treatment, sludge reduction, energy recovery and membrane fouling. *Biosensors and Bioelectronics*, 49, 92-98. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2013.04.005>
- Suthar, S. (2010). Pilot-scale vermireactors for sewage sludge stabilization and metal remediation process: Comparison with small-scale vermireactors. *Ecological Engineering*, 36(5), 703-712. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.12.016>

- Tang, X., Cui, Y., & Liu, L. (2021). Pyrolyzing pyrite and microalgae for enhanced anode performance in microbial fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(75), 37460-37468. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.09.054>
- Tanikkul, P., & Pisutpaisal, N. (2015). Performance of A Membrane-Less Air-Cathode Single Chamber Microbial Fuel Cell in Electricity Generation from Distillery Wastewater. *Energy Procedia*, 79, 646-650. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.548>
- Taslim, T., Iriany, I., Alexander, V., Nova, S., & Burmana, A. (2024). Inlet diverters and oil collectors in distillation columns for reducing COD and BOD5 in biodiesel plants. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 10, 100908. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100908>
- Thakur, H., Ira, R., Verma, N., Sharma, V., Kumar, S., Dhar, A., Prakash, T., & Powar, S. (2023). Anaerobic co-digestion of food waste, bio-flocculated sewage sludge, and cow dung in CSTR using E(C2)Tx synthetic consortia. *Environmental Technology & Innovation*, 32, 103263. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103263>
- Thakur, S., Calay, R., Mustafa, M., Eregno, F., & Patil, R. (2025). Importance of substrate type and its constituents on overall performance of microbial fuel cells. *Current Research in Biotechnology*, 9, 100272. <https://doi.org/10.1016/j.crbiot.2025.100272>
- Torres, G., Condori, A., Fernandez, J. & Pampa, N. (2020). Efecto de la resistencia externa y área superficial del electrodo de grafito en la biodegradación de la materia orgánica y generación de bioelectricidad en celdas de combustible microbiano. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 11(6), 1-38. <https://revistatyca.org.mx/index.php/tyca/article/view/2109>
- Torres, K., Macea, M., Rojas, L., Rodriguez, Y., Romero, L., Cahuana, A., & Martínez, M. (2022). Eficiencia del carbón Guajiro y Quitosano en la remoción de parámetros fisicoquímicos en aguas residuales domésticas. *Revista Politécnica*, 18(36), 162–186. <https://doi.org/10.33571/rpolitec.v18n36a12>
- Utami, T., Arbiyanti, R., Hidayatullah, I., Yusupandi, F., Hamdan, M., Putri, N., Riyadi, F., & Boopathy, R. (2024). Paracetamol degradation in a dual-chamber rectangular membrane bioreactor using microbial fuel cell system with a microbial consortium from sewage sludge. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 9, 100551. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100551>
- Valdrez, I., Almeida, M., & Dias, J. (2022). Direct recovery of Zn from wasted alkaline batteries through selective anode's separation. *Journal of Environmental Management*, 321, 115979. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115979>
- Vidhyeswari, D., Surendhar, A., & Bhuvaneshwari, S. (2022). Enhanced performance of novel carbon nanotubes - sulfonated poly ether ether ketone (speek) composite proton exchange membrane in mfc application. *Chemosphere*, 293, 133560. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133560>
- Vobrubá, T., Hartl, M., Langergraber, G., Pucher, B., Gattringer, H., Bertino, G., Panzenböck, F. & Kisser, J. (2025). Vertical green wall system demonstration for domestic wastewater treatment and on-site reuse in an Austrian eco-village. *Ecological Engineering*, 211, 107460. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2024.107460>
- Wang, C., Shen, J., Chen, Q., Ma, D., Zhang, G., Cui, C., Xin, Y., Zhao, Y., & Hu, C. (2020). The inhibiting effect of oxygen diffusion on the electricity generation of three-chamber microbial fuel cells. *Journal of Power Sources*, 453, 227889. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.227889>
- Yang, W., Wang, X., Santoro, R., Chen, Y. & Chen, H. (2020). Low-cost Fe–N–C catalyst derived from Fe (III)-chitosan hydrogel to enhance power production in microbial fuel cells. *Chemical Engineering Journal*, 380, 122522. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122522>
- Yang, Z., Chen, F., Xu, L., Jin, Y., Xu, S., Wang, J., Shen, X., Zhang, L., & Song, Y. (2021). Bioelectrochemical process for simultaneous removal of copper, ammonium and organic matter using an algae-assisted triple-chamber microbial fuel cell. *Science of The Total Environment*, 798, 149327. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149327>
- Yang, Z., Pei, H., Hou, Q., Jiang, L., Zhang, L., & Nie, C. (2018). Algal biofilm-assisted microbial fuel cell to enhance domestic wastewater treatment: Nutrient, organics removal and bioenergy production. *Chemical Engineering Journal*, 332, 277-285. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.09.096>
- Yoo, K., Song, Y.-C. & Lee, S.-K. (2011). Características y operación continua de una celda de combustible microbiana con cátodo de aire flotante (FA-MFC) para el tratamiento de aguas residuales y generación de electricidad. *Environmental Engineering Research*, 15(2), 245–249. <https://doi.org/10.1007/s12205-011-1160-6>
- Zheng, X., Chen, Y., Wang, X. & Wu, J. (2017). Using mixed sludge-derived short-chain fatty acids enhances power generation of microbial fuel cells. *Energy Procedia*, 105, 1282–1288. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.458>
- Zoghalmi, R., Hamdi, H., Mokni-Tlili, S., Hechmi, S., Khelil, M., Aissa, N., Moussa, M., Bousnina, H., Benzarti, S., & Jedidi, N. (2020). Monitoring the variation of soil quality with sewage sludge application rates in absence of rhizosphere effect. *International Soil and Water Conservation Research*, 8(3), 245-252. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2020.07.007>